

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ASTRONOMIA
Titán, ¿luna o planeta?

GEOLOGIA
Origen biológico de los minerales

FISICA
Efecto Branly y medios granulares

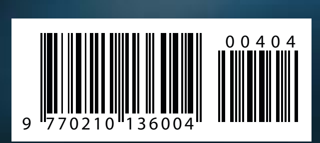
BIOLOGIA
Calamares gigantes en el abismo submarino

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

EL CEREBRO LATENTE

Nuestro cerebro nunca deja de hallarse activo



SUMARIO

Mayo de 2010/ Número 404



Conseguir la ignición no sería el mayor problema de una central de fusión nuclear.

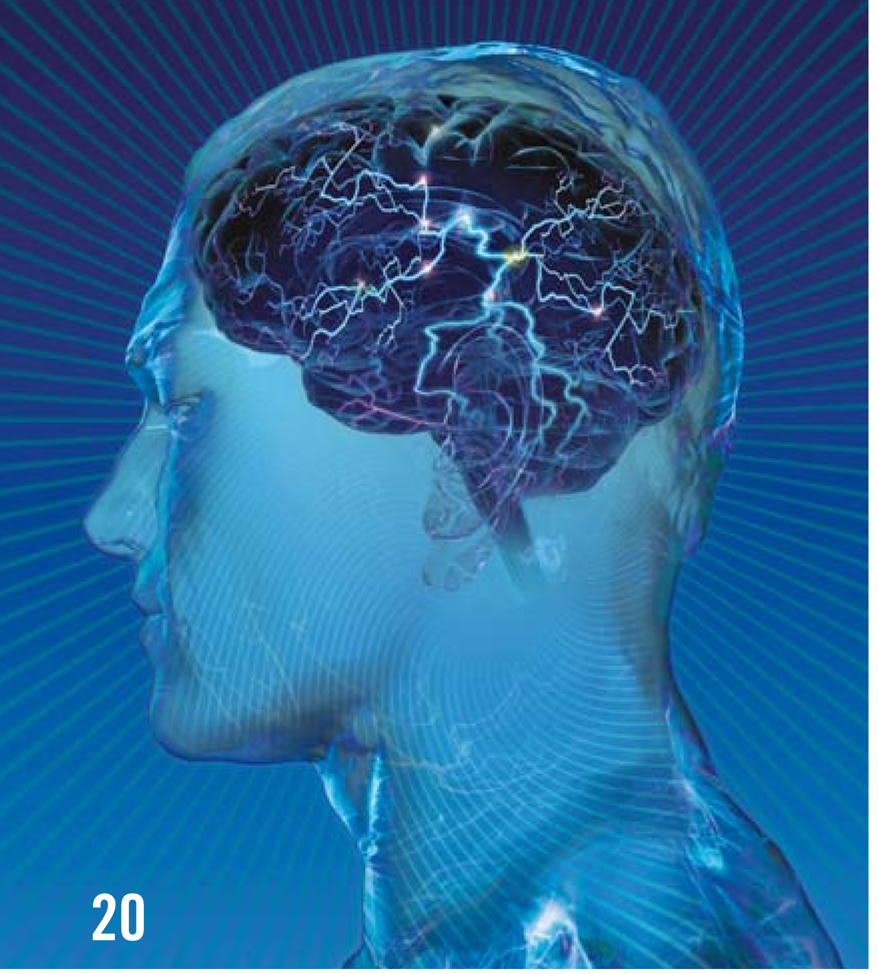


Clima y geología de la mayor luna de Saturno.



El número de minerales ha evolucionado desde apenas una docena hasta las 4400 especies actuales.

ARTICULOS



Cuando nos encontramos en reposo, nuestro cerebro mantiene un elevado nivel de actividad.



¿Cómo reaccionan las plantas ante el calentamiento?



En el efecto Branly se basaron las primeras comunicaciones radioeléctricas.

SECCIONES

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
COORDINADORA DE EDICIONES Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza
Ernesto Lozano Tellechea
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Stuart F. Brown, W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Christie Nicholson, Michelle Press, John Rennie, Michael Shermer, Sarah Simpson
ART DIRECTOR Edward Bell
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
VICE PRESIDENT, OPERATIONS AND ADMINISTRATION Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Florek

DISTRIBUCION

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

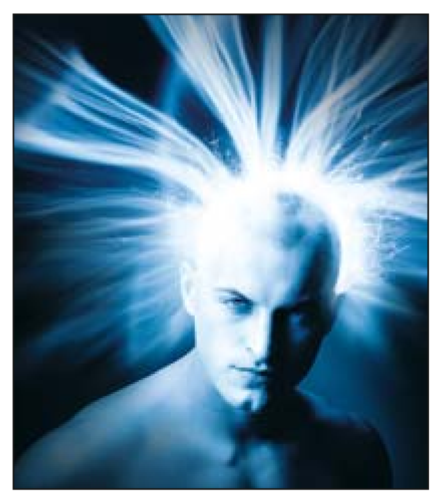
PUBLICIDAD

Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Mª. Rosa Zapatero Osorio: *Superficie y atmósfera de Titán* y *Apuntes*; Juan Manuel González Mañas: *La red neuronal por defecto*; Sònia Ambròs y Albesa: *La evolución de los minerales*; Luis Bou: *La función dual del sulfuro de hidrógeno* y *Apuntes*; J. Vilardell: *Cambio climático, un experimento controlado* y *Hace...*; Joandomènec Ros: *Encantadores de lombrices*; Angel Garcimartín: *El efecto Branly*; Bruno Moreno: *Apuntes* y *Ciencia y sociedad*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: Aaron Goodman

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

El desarrollo del lactante. «Esperábamos que las ratas sometidas a descargas eléctricas quedarían afectadas por la experiencia y, cuando alcanzaron el estado adulto, buscamos en ellas señales de trastornos emocionales. Para nuestra sorpresa, fue el grupo de referencia (las ratas que no habíamos tratado) el que demostró un comportamiento extraño. La conducta de las ratas que habían recibido descargas no se distinguía de la del grupo de referencia, manipuladas igual pero sin las descargas. Por tanto, tuvimos que replantearnos la cuestión. Desde entonces, nuestras investigaciones en el Instituto y Hospital Psiquiátrico Columbus de la Universidad estatal de Ohio se han centrado, no tanto en los efectos de una experiencia estresante (que después de todo, es algo habitual en los lactantes), sino en los efectos de la ausencia de adversidades en esa edad. —Seymour Levine»

...cien años

Competiciones aéreas. «Louis Paulhan, el más distinguido de los aviadores, ha ascendido hasta los mil quinientos metros de altura, e incluso después ha superado esa hazaña volando de Londres a Manchester. La distancia cubierta ha sido de 300 kilómetros, con sólo una parada de repostaje y una velocidad media de casi 45 kilómetros por hora. La importancia de la formidable competición entre el francés Paulhan y el inglés Grahame White sólo se puede apreciar si se consideran algunos de los pormenores recibidos por cable a este lado del Atlántico. Que Paulhan ganase el premio de 50.000 dólares con tan magnífico estilo hace honor a su habilidad de pilotaje, pero también a la calidad del biplano Farman con que ganó la competición.»

Mineros urbanos. «En la terminal del ferrocarril de Pennsylvania en Nueva York, los túneles se abrieron en su mayor parte con unas gigantescas barrenas que excavaban en el cieno y la arena a 110 metros bajo el lecho del río Hudson (*véase la ilustración*). Los túneles fueron construidos por hombres de todas las nacionalidades, destacando con mucho los de raza negra. Afirmaban que algo tendría el aire comprimido que generaba energía y entusiasmo, ya que los mineros urbanos (*sand hogs*) competían entre sí para conseguir los máximos avances. El mejor puntal de los obreros era el café, que debía estar disponible en todo momento y lugar. La más importante de las normas a cumplir durante la construcción de los túneles era la que exigía atravesar las cámaras estancas con lentitud.»

INGENIERIA PESADA: Túneles ferroviarios bajo el río Hudson, 1910.

SCIENTIFIC AMERICAN SUPLEMENT, VOL. LXIX, N.º 1793; 14 DE MAYO DE 1910

...ciento cincuenta años

Tuberculosis endémica. «El doctor Henry B. Milton estima que casi un sexto de las muertes en la raza humana se debe a la tisis. Entre 1846 y 1860 la mortalidad en Nueva York era de uno sobre 8,46. La prevalencia de la enfermedad en las ciudades grandes no siempre supera la de las pequeñas. Entre los distintos oficios y profesiones, la mayor mortalidad se da en los sastres y los obreros de las fábricas de calzado; la menor, entre los abogados.»

Faro eléctrico. «El profesor Faraday, de la Regia Sociedad, expuso la aplicación de la luz eléctrica al faro de South Foreland (Inglaterra) realizada por el profesor Holmes. 'En el faro de South Foreland se emplean dos máquinas magnetoeléctricas, accionada cada una de ellas por un motor de vapor de dos caballos de potencia. Aparte del desgaste y deterioro por el uso, los materiales que consume el ingenio para producir luz son carbón y agua (para las calderas de los motores) y puntas de carbono (para la lámpara de la linterna).' Aunque la extraordinaria brillantez de la luz es indudable, en comparación con otras, el gasto que conlleva debe ser muy superior al del uso de las lentes de Fresnel con el mejor aceite en el modo habitual.»

Química doméstica. «Aconsejaríamos disponer en las mansiones una estancia aparte con el rótulo de 'laboratorio', o la antigua denominación '*still-room* '(sala de alambiques). La cantidad de conocimientos que se adquieren en un laboratorio privado es mucho mayor de lo que pueda pensarse a primera vista, y la diversión, variada como un caleidoscopio, es (desde un punto de vista intelectual) infinitamente superior a la del ganchillo o el bordado. La delicadeza de manipulación que exigen los experimentos químicos se adapta a la perfección a las destrezas femeninas, e incluso mejor que a las del sexo fuerte; y, por tanto, encomendamos a las señoras la responsabilidad de convertirse en los *chefs* de la moderna sala de alambiques —*Art of Perfumery*, de Septimus Piesse.»

EVOLUCION

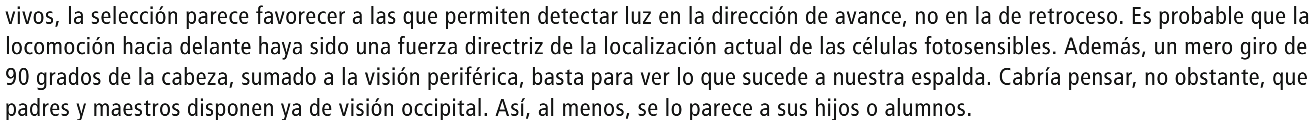
¿Por qué no tenemos ojos en la nuca?



Por muy valiosa que pudiera resultar la facultad de detectar depredadores que se aproximasen por detrás —o de tener a la vista la prole que nos sigue—, debemos tener presente que la selección natural no está orientada hacia el desarrollo o formación de cosa alguna, y ni que decir tiene, de órganos "perfectos". Es decir, el mero hecho de que ciertos rasgos pudieran resultar convenientes no hará que la mutación aleatoria se oriente necesariamente hacia ellos.

Las partes del cuerpo que nos permiten detectar las vistas, los sonidos, olores y sabores, la temperatura y los aspectos táctiles de nuestro entorno no surgieron de un plan maestro preconcebido o de un esquema de montaje. La selección natural las fue creando de forma "artesanal" a partir de componentes disponibles en células y tejidos existentes; modeló, como si fueran pellas de barro, versiones arcaicas e intermedias de las células y órganos sensoriales a lo largo de millones de años hasta conferirles la forma y función de nuestros cuerpos modernos. Nunca han existido órganos perfectamente formados para la vista o el oído, tan sólo versiones que cumplen esa función.

La primera célula dotada de fotosensibilidad debió resultar de una mutación aleatoria en las criaturas pluricelulares más arcaicas. La posibilidad de detectar luz confería una ventaja selectiva. Así lo demuestran las docenas de veces que ha evolucionado en diversos invertebrados, y de forma independiente, la agudeza visual: ello ha resultado en por lo menos nueve formas de ojos.



Si bien las células fotosensibles debieron aparecer en diferentes partes de los primeros seres vivos, la selección parece favorecer a las que permiten detectar luz en la dirección de avance, no en la de retroceso. Es probable que la locomoción hacia delante haya sido una fuerza directriz de la localización actual de las células fotosensibles. Además, un mero giro de 90 grados de la cabeza, sumado a la visión periférica, basta para ver lo que sucede a nuestra espalda. Cabría pensar, no obstante, que padres y maestros disponen ya de visión occipital. Así, al menos, se lo parece a sus hijos o alumnos.

—S. Jay Olshanky
Universidad de Illinois en Chicago

NAVES ESPACIALES

¿Cómo se orientan en ausencia de polos magnéticos?

Sin la presencia constante de un campo magnético de referencia, como tienen los usuarios de las brújulas en la Tierra, las naves espaciales emplean un sistema tridimensional de coordenadas cartesianas, o sistema de referencia, de concepción propia.

Un sistema de referencia común utilizado hoy día en el espacio profundo es el Ecuador Medio Terrestre y Equinoccio de Epoca J2000 (EME2000). Su nombre aglutina los numerosos elementos necesarios para definir un sistema tridimensional de coordenadas: un cuerpo de referencia (la Tierra); un plano de referencia (el ecuador medio, un ecuador idealizado que no incluye el pequeño movimiento de nutación del eje terrestre); una dirección de referencia (el equinoccio vernal, la línea que une la Tierra y el Sol el primer día de primavera); y un tiempo de referencia (J2000, o el 1 de enero de 2000, a las 12:00:00 horas de tiempo de efemérides, una escala temporal uniforme empleada en el cálculo de movimientos planetarios). El cuerpo y el plano de referencia definen el plano *x-y* del sistema de coordenadas. El eje *z* es perpendicular al plano *x-y*, por lo general a lo largo del eje de rotación del cuerpo. Se necesita una referencia temporal porque los planos de referencia sufren movimientos sutiles causados por las fuerzas de gravedad de los otros cuerpos del sistema solar.



Con este sistema de coordenadas, una nave espacial debe poder medir y controlar su orientación. En lugar de una brújula, los sensores de las naves utilizan el Sol y las estrellas para determinar la orientación relativa al sistema de coordenadas. Las direcciones deseadas pueden indicarse de varias formas con respecto al sistema definido, pero suelen emplearse dos medidas angulares. En astronomía, la ascensión recta y la declinación identifican las direcciones en el cielo. La ascensión recta es la medida angular en el plano de referencia; la declinación mide el ángulo por encima o por debajo del plano.

—Christopher Potts,
Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena
(*NASA*)

MECANICA CUANTICA

Estados cuánticos macroscópicos



Un grupo de la Universidad de California en Santa Barbara liderado por A. Cleland ha conseguido, por primera vez, observar la superposición de estados cuánticos en un sistema macroscópico: un resonador mecánico de unos 30 micrometros de largo (observable, de hecho, por el ojo humano) acoplado a un *qubit*. Este resultado confirma que las extrañas leyes de la mecánica cuántica también se cumplen en objetos de escala micrométrica. El trabajo, que probablemente abrirá las puertas a una nueva generación de experimentos hasta ahora irrealizables, representa un paso indiscutible hacia la resolución de la famosa paradoja del gato de Schrödinger.



SEGURIDAD ALIMENTARIA

Riesgos de la irradiación de alimentos

Los tratamientos de irradiación consisten en someter a los alimentos a dosis de radiaciones ionizantes, que destruyen o degradan el ADN o las proteínas de bacterias patógenas.

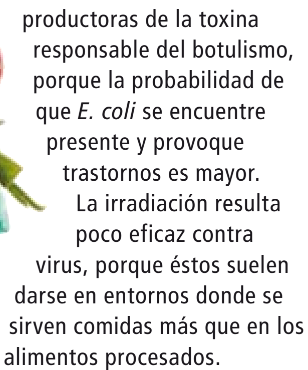
La irradiación parece ser inocua para los alimentos, en el sentido de que no causa alteraciones tóxicas en sus compuestos. Sí se producen subproductos peculiares, pero no se ha demostrado que provoquen efectos perniciosos sobre nuestra salud. Se sospechaba que la 2-alquil-ciclobutanona, subproducto derivado de un ácido graso, provocaba mutaciones celulares cancerígenas, pero las investigaciones llevan a pensar de otro modo.

Dos son las fuentes principales de irradiación: elementos radiactivos, como el cobalto 60, y la radiación con haz de electrones. El cobalto 60 es un isótopo del cobalto, una variante radiactiva detectable de ese elemento, que emite rayos gamma. La radiactividad de un elemento no se puede modificar a voluntad; en el caso del cobalto 60, la exposición ha de durar varios minutos. El haz electrónico es más intenso: bastan sólo algunos segundos para que logre el efecto deseado. Se está experimentando también con rayos X para ver si ofrecen otra técnica viable.

Pero la irradiación no es una panacea. Suele ajustarse la dosis y duración al patógeno de mayor riesgo y con máxima probabilidad de hallarse en un alimento dado. Al pasteurizar carnes, la radiación se dirige contra *E. coli* y no contra las esporas de *Clostridium botulinum*, productoras de la toxina responsable del botulismo, porque la probabilidad de que *E. coli* se encuentre presente y provoque trastornos es mayor.

La irradiación resulta poco eficaz contra virus, porque éstos suelen darse en entornos donde se sirven comidas más que en los alimentos procesados.

—Sam Beattie
Universidad estatal de Iowa





ANTHONY-MASTERSON *Digital Vision/Getty Images (cesta de fresas)*; DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DE EE.UU., SERVICIO DE INSPECCION Y SEGURIDAD ALIMENTICIA *(símbolo irradiación)*; SCIENTIFIC AMERICAN *(fotoilustración)*; URSULA MARKUS *Photo Researchers, Inc. (abajo, derecha)*

METABOLISMO

Un colesterol mutante previene la demencia

Solemos asociar el colesterol a las enfermedades cardiovasculares. Sin embargo, cada vez hay más datos que muestran que este lípido tiene una gran importancia para la salud del cerebro, donde se encuentra una cuarta parte del colesterol del cuerpo. Han descubierto que una alteración bastante común de un gen que controla el tamaño de las partículas de colesterol ralentiza la evolución de la demencia y protege contra la enfermedad de Alzheimer.

Las personas con esta mutación, que consiste en el cambio de un aminoácido (isoleucina) por otro (valina) en el gen para la proteína transportadora de ésteres de colesterol (CETP), mostraron un enlentecimiento de la pérdida de memoria, según un estudio publicado este mismo año en el *Journal of the American Medical Association*. Los probandos con dos alelos de valina experimentaron un declive cognitivo un 51 por ciento más lento que los que poseían isoleucina y una reducción del 70 por ciento en el riesgo de desarrollar la enfermedad de Alzheimer.

Los resultados son todavía provisionales y se desconocen las causas de esa protección cognitiva, pero el gen se ha vinculado a la longevidad y ya se están diseñando medicamentos que alteren la función de CETP para el tratamiento de enfermedades cardíacas. Quizás estas terapias proporcionen algunos de los beneficios cognitivos revelados en dicho estudio.

—Katherine Harmon

La contaminación por ozono en España

Siguen aumentando los niveles de ozono, que se concentra en la periferia de núcleos urbanos e industriales

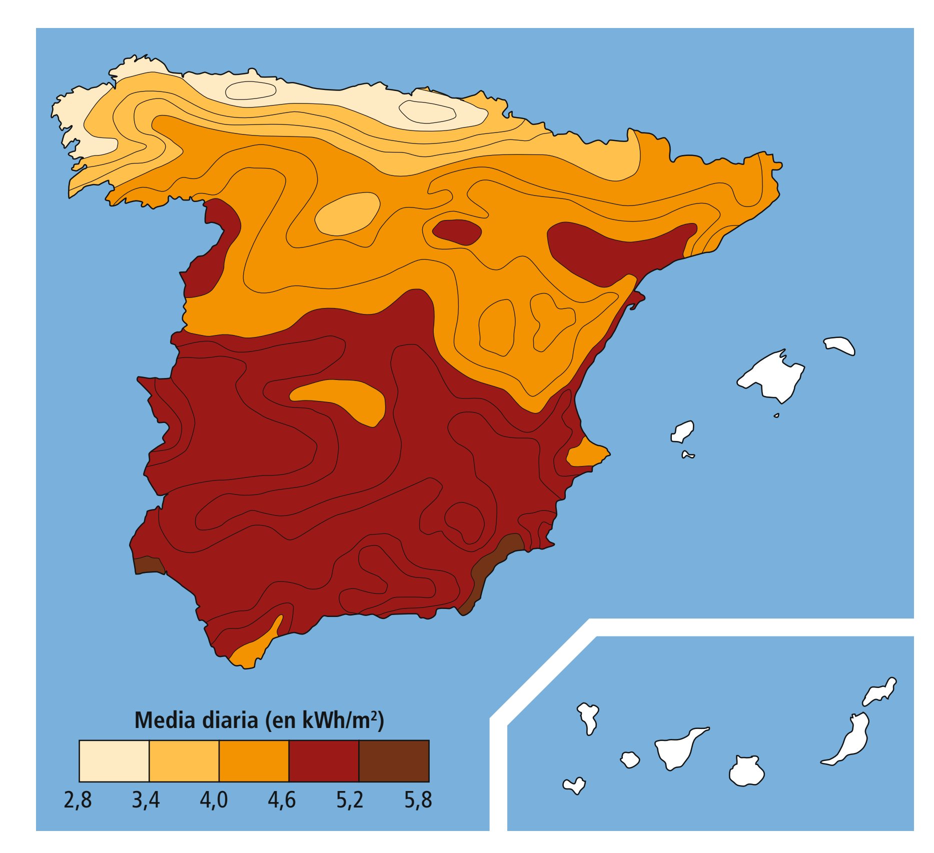
El ozono troposférico se forma a partir de óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles bajo luz visible; su concentración aumenta cuando la radiación solar es más intensa. Afecta a nuestro sistema respiratorio: provoca inflamaciones en las mucosas y tejido conjuntivo, causa asma y perjudica a los grupos de población más vulnerables (niños, ancianos y enfermos crónicos). Asímismo, causa alteraciones a animales y plantas. Reduce la fotosíntesis, aumenta la senescencia y disminuye el rendimiento de los cultivos. Daña también algunos materiales (elastómeros, pinturas y colorantes artísticos).

El ozono presenta un fuerte carácter reactivo. Se combina de inmediato con compuestos reductores. En las ciudades, donde encuentra productos con los que combinarse, se registran concentraciones moderadas. En cambio, cuando los precursores son transportados por el viento hasta zonas exteriores de núcleos urbanos e industriales, en donde no se encuentran compuestos con los que reaccionar tan fácilmente, se forma y acumula ozono en cantidades superiores. Los valores de ozono medidos en estaciones periféricas son superiores a las de ciudades y polígonos industriales.

Las concentraciones de ozono vienen reguladas por la Directiva Comunitaria 2002/3/CE, si bien en parte del estudio se ha aplicado la Directiva 92/72. Ambas directivas establecen umbrales de protección y de riesgo.

El ozono en España

Nuestro país es un importante emisor de precursores de ozono (con valores medios de 3 toneladas por kilómetro cuadrado y año) y presenta niveles elevados de radiación solar (32 provincias alcanzan las 2700 horas anuales). Influye también en el comportamiento del ozono el régimen de brisas, que afecta a nuestra costa de más de 3900 kilómetros de longitud. Las brisas llevan tierra adentro los precursores emitidos, originándose ozono en su trayectoria. El ozono puede volver hacia la costa; allí se acumula en capas de reserva que, tras procesos de subsidencia, se incorporan a nuevas emisiones. Esas inyecciones explican el segundo máximo de ozono diario (matutino o nocturno) que se produce, además del pico asociado a las horas de máxima insolación. El ozono troposférico comenzó a medirse en España a comienzos de los años noventa del siglo pasado. La implantación de estaciones ha sido progresiva; existen todavía grandes zonas por cubrir.



1. Mapa de radiación solar anual. Las zonas más oscuras corresponden a los mayores niveles de radiación recibidos. Treinta y dos provincias de nuestro territorio alcanzan o superan las 2700 horas solares anuales.

FUENTE: MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO

De 1990 a 1999

Los primeros estudios de la contaminación por ozono mostraron un aumento de las concentraciones a lo largo del decenio de los noventa y en todas las localidades [*véase* "Evolución del ozono troposférico", por Federico Velázquez de Castro, Federico López Mateos y Emiliano Hernández Martín; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre 2000]. Destacaba Madrid, cuyos valores medios anuales pasaron de 15 microgramos por metro cúbico (μg/m³) en 1990 a 31 en 1996, valor que oscilaría en los años siguientes sin alterar el perfil ascendente. En algunos lugares el ozono creció de forma brusca (en Gijón aumentó de 21,8 μg/m³ en 1994 a 29,8 en 1995); en otros, suavemente.

Se confirmó que la concentración de ozono era superior en las zonas a sotavento de los núcleos de emisión. En Madrid, la estación correspondiente a su área más limpia (Casa de Campo) registró los valores mayores; medidas realizadas en su provincia (Loeches, Hoyo y Villanueva) presentaron valores superiores a los urbanos.

La contaminación por ozono en Andalucía presentaba un perfil elevado; in-



2. Equipos de medida de ozono mediante absorción ultravioleta. Se han instalado en estaciones urbanas, olvidando los enclaves suburbanos y periféricos, en donde las concentraciones de ozono son mayores.

cluso los valores más bajos, detectados en Sevilla (36,5 μg/m³), superaban los de otras grandes ciudades españolas. Jaén, Granada y Málaga registraron también valores notables: 46,5, 47 y 50 μg/m³, respectivamente.

Se estudiaron los ciclos de brisa en la Comunidad Valenciana. En puntos rurales del interior, el umbral de protección de la vegetación (UPV) llegó a superarse durante seis meses consecutivos. Los vientos de levante, que arrastran los contaminantes emitidos a lo largo de la costa mediterránea, contribuyen a elevar los valores de ozono en el sudeste peninsular.

Asimismo, deben considerarse los ciclos convectivos que actúan en verano en la península. Originados en las zonas mediterráneas que se hallan bajo una intensa insolación, los ciclos de brisa, ayudados por las pendientes de las montañas, introducen hacia el interior las emisiones de precursores; durante el trayecto se genera ozono, que alcanza valores notables en las mesetas y otros enclaves interiores. En todos esos puntos se midieron valores superiores a los 40 μg/m³.

Los efectos de la contaminación por ozono en nuestro territorio no se han valorado todavía. Falta establecer correlaciones que cuantifiquen los daños, sanitarios, agrícolas y materiales. Estudios comparativos y métodos de regresión apuntaban en 1995 unos costes estimados en 300 millones de euros anuales. Por su parte, la tendencia creciente de las temperaturas contribuirá a acentuar esos procesos, puesto que existe una correlación entre temperatura, mortalidad y contaminación por ozono.

De 2000 a 2005

Se han analizado datos procedentes de Gijón, Barcelona, Castilla-León, Madrid, Extremadura, Granada y zonas de Andalucía.

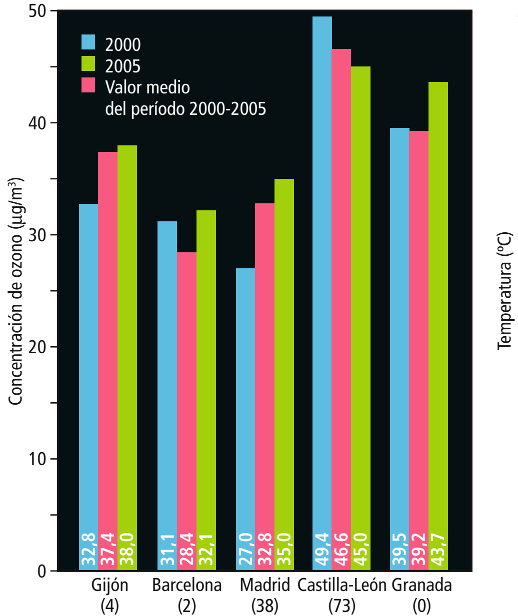
En Gijón, el valor máximo se alcanzó en 2003, coincidiendo con la ola de calor que afectó el verano de 2009 a toda Europa. En 2000 se superó el UPV en 88 ocasiones, en 2001 en 128, y en 2002, en 134, momento en que cambió la Normativa y dejó de medirse este parámetro.

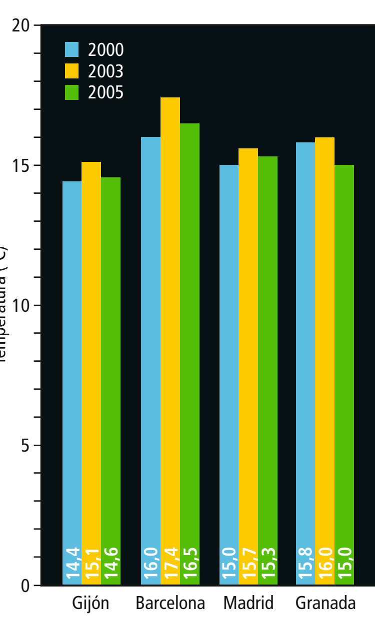
En Barcelona se superó el umbral de información a la población (UIP) una vez en 2003 y otra en 2005, aunque se registraron valores horarios por encima de 120 μg/m³ en casi todas las estaciones entre junio y septiembre (en algunos casos desde febrero).

En Madrid, el 29 de abril de 2000 la concentración de ozono alcanzó valores elevados y anómalos. Como consecuencia, se superó el UIP en nueve estaciones y el Umbral de Alerta a la Población (UAP) en dos.

En Granada, aunque no se rebasó el UIP en ninguna ocasión, se superó el Valor Objetivo de Protección de la Salud Humana (VOPSH, 120 μg/m³) en tres ocasiones en 2000, 14 en 2001, 6 en 2002, 17 en 2003, 33 en 2004 y 72 en 2005. En el sur de la península y, sobre todo, en la zona occidental, se registraron los mayores valores de ozono. En todos los emplazamientos se alcanzaron máximos por encima del UIP, superando en varias ocasiones los 200 μg/m³.

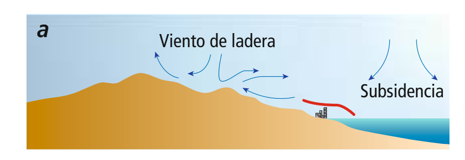
Se realizaron estudios en Extremadura, llevándose a cabo medidas en el interior de la dehesa en 2003, 2004 y 2005. En 2003, durante los 14 primeros días de agosto se superó el VOPSH hasta en un 50 por ciento; el UIP se rebasó en 16 ocasiones. En 2004, entre el 30 de abril y el 22 de octubre se superó el VOPSH 57 días. También se superó el valor objetivo de protección de

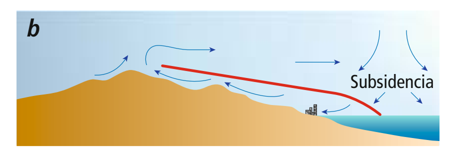


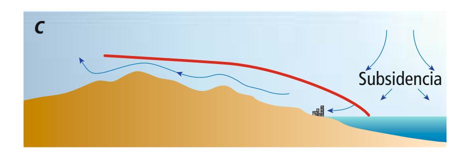


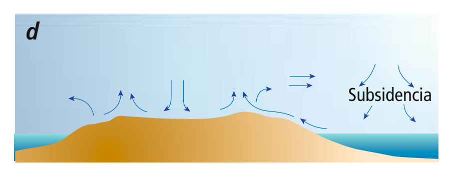
3. A la izquierda, concentración de ozono en cinco localidades estudiadas de 2000 a 2005; entre paréntesis, el número de superaciones del umbral de información a la población (UIP). A la derecha, evolución de la temperatura en el mismo período.

F. X. SAMARRA. RED DE MEDIDA DE BARCELONA *(equipo de medidas de ozono)*









4. TRANSPORTE DE CONTAMINANTES. Los contaminantes emitidos en la línea de costa, entre ellos los precursores de ozono, son recirculados en ciclos de brisa cortos, primero de carácter local y más tarde regional (*a-c*); así lo muestra la evolución del límite de la capa de mezcla (*línea roja*). En verano, cuando la radiación solar es más intensa, se forman ciclos convectivos que transportan los contaminantes hasta las mesetas y zonas interiores (*d*).

la vegetación (VOPV, 18.000 μg/m^3) con una concentración de 28.784 μg/m^3. En 2005, las medidas realizadas entre el 22 de abril y el 4 de octubre mostraron una superación del VOPSH en 18 ocasiones.

Conclusiones

Los datos anteriores muestran un crecimiento moderado de las concentraciones de ozono a lo largo de la primera mitad del decenio pasado. No se trata de un crecimiento lineal, sino fluctuante, condicionado por la influencia de factores meteorológicos.

Se ha confirmado una estrecha correlación entre las temperaturas registradas y los valores de ozono, sobre todo en Madrid, Gijón y Extremadura. En 2003, el año más cálido, se registraron los niveles de ozono más elevados.

En relación con el decenio de los noventa, Madrid ha pasado de una media de 22 μg/m^3 a 32,8 en el intervalo 2000-2005. Barcelona se mantiene (de 30,6 a 28,4 μg/m^3). Gijón ha experimentado un fuerte aumento (de 25,8 a 37,6 μg/m^3). Granada ha experimentado una mejora (de 45 a 39,2 μg/m^3), lo que puede deberse a la desaparición de algunas estaciones de control y la inclusión de otras nuevas. Castilla-León tampoco presenta una gran variación (de 44,8 a 46,6 μg/m^3). En Extremadura y Andalucía occidental se han detectado concentraciones de ozono elevadas y permanentes.

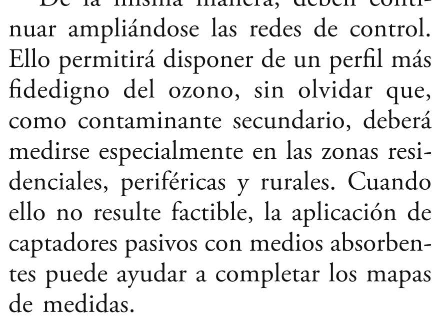
En lo que atañe a la distribución de la contaminación, las zonas periféricas de las áreas industriales y las suburbanas continúan registrando los valores máximos, superiores a los de los núcleos de emisión, de perfil moderado. Ese comportamiento se observa sobre todo en Madrid, Extremadura y Andalucía. Otro es el caso de los entornos rurales, como el de la Comunidad de Castilla-León, cuyos valores notables de ozono deben atribuirse, en parte, a los ciclos convectivos antes explicados. Las brisas y vientos de levante incrementan la concentración de ozono en la franja mediterránea.

La contaminación es más crónica que aguda. No suelen producirse, salvo en situaciones especiales y en áreas específicas, superaciones del UIP y aún menos del UAP. Sin embargo, en los meses de primavera y verano la contaminación por ozono es generalizada, superándose los umbrales de protección.

Futuro

La contaminación por ozono en España continúa alcanzando valores notables. Dada la abundancia de compuestos precursores, procedentes del tráfico y la industria, en un ambiente de temperaturas superiores, durante la primera mitad del decenio pasado han seguido creciendo las concentraciones de ozono. Además, el avance del cambio climático, que afecta sobre todo a nuestra península (1,5 ºC de subida frente a los 0,74 ºC de media planetaria), continuará influyendo en el aumento del ozono en los próximos años.

Las autoridades deberían realizar campañas periódicas de información para alertar a los grupos de población más sensibles. Asimismo, deberían promoverse políticas de movilidad sostenible que contemplaran el transporte público, los vehículos eficientes, la bicicleta y combustibles menos contaminantes.



De la misma manera, deben continuar ampliándose las redes de control. Ello permitirá disponer de un perfil más fidedigno del ozono, sin olvidar que, como contaminante secundario, deberá medirse especialmente en las zonas residenciales, periféricas y rurales. Cuando ello no resulte factible, la aplicación de captadores pasivos con medios absorbentes puede ayudar a completar los mapas de medidas.



Federico Velázquez de Castro González
Centro de Educación Ambiental
Granada



5. LAS ENERGIAS RENOVABLES contribuirán a reducir los niveles de ozono, cuyos precursores se producen en los entornos urbanos e industriales.

M. MILLAN (*esquema del transporte de contaminantes*); KEVIN CONNORS, *Morguefile Photo* (*fotografía*)

El pequeño gran problema de la nanoestructura

Determinar las coordenadas atómicas de una estructura nanométrica es tan necesario cuan difícil

En nanotecnia, la posición de un átomo puede marcar la diferencia: si un material funcionará como semiconductor o como aislante, si desencadenará un proceso químico esencial o si lo detendrá bruscamente. La capacidad de definir con exactitud cada átomo de una nanopartícula permitiría mantener un control pleno de las propiedades y comportamiento de un nanomaterial. Sin embargo, las técnicas de visualización de la estructura atómica, como la microscopía electrónica y la de efecto túnel, no son suficientes para los nanoingenieros, que necesitan las coordenadas exactas de cada átomo.

En palabras de Simon Billinge, de la Universidad de Columbia y el Laboratorio Nacional de Brookhaven, si una imagen vale más que mil palabras —en referencia a las cautivadoras fotos de nanoestructuras—, una tabla de coordenadas atómicas precisas vale más que mil imágenes.

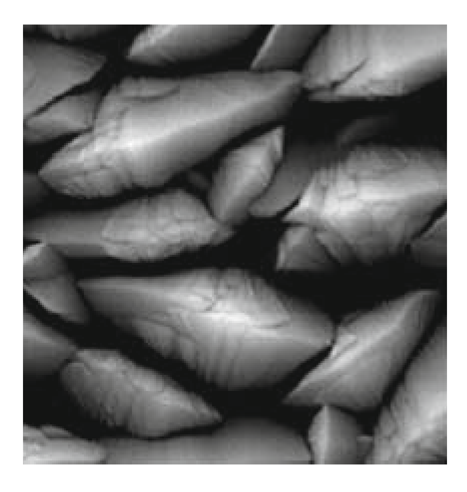
Definir la estructura atómica de los materiales sólidos habituales, en contraste con los nanomateriales, es relativamente fácil, porque suelen mostrar lo que los físicos denominan orden cristalino u orden de largo alcance: una estructura regular y repetida, que apenas cambia a escala molecular o atómica.

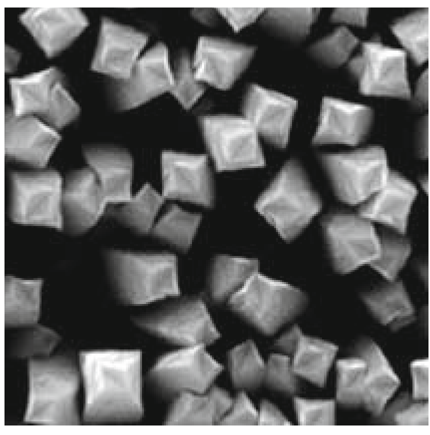
Los científicos han examinado tradicionalmente esos materiales mediante la cristalografía, que se basa en técnicas de dispersión: un haz de rayos X o de neutrones incide sobre una muestra del material; los átomos se dispersan y reflejan el haz, formando estructuras denominadas picos de difracción de Bragg (en honor de Sir William Henry Bragg y su hijo, que descubrieron el fenómeno en 1903).

Los picos de Bragg, que guardan relación con la distancia entre capas atómicas, proporcionan información de la que se deduce matemáticamente la ordenación atómica de la sustancia. Tan poderoso método ha revelado la estructura de un gran número de sustancias, desde el polvo cósmico hasta nuestro ADN.

Sin embargo, la cristalografía no proporciona la resolución necesaria para la escala nanométrica, en donde las diferencias estructurales se producen a distancias mucho más cortas. Cuando se examina un nanomaterial mediante cristalografía estándar, los picos de Bragg se amplían y se solapan, de manera que ya no pueden diferenciarse unos de otros. Los algoritmos desarrollados para la cristalografía no funcionan. No permiten saber dónde se aloja cada átomo. Sin una información estructural precisa, la fabricación nanotécnica sigue siendo un juego de aproximaciones y estimaciones.

Para resolver el problema de las nanoestructuras, los investigadores utilizan una combinación de técnicas de captación de imágenes y métodos matemáticos. Dicha estrategia plural construye modelos precisos a partir de distintas series de datos, en un proceso de "modelado complejo".





Recubrimientos nanoestructurados con diferentes morfologías, obtenidos por pulverización catódica (*sputtering*). Fotografías obtenidas con un microscopio electrónico de barrido.

PROYECTO NANOCOMP, COORDINADO POR MR. MICHAEL STUEBER, UNIVERSIDAD DE KARLSRUHE

Billinge ha combinado la cristalografía con un enfoque que suele utilizarse para examinar sustancias no cristalinas, como vidrios y líquidos. Aprovecha la función de distribución de pares (FDP), una función que describe la probabilidad de encontrar un átomo a cierta distancia de otro y proporciona datos estadísticos que permiten calcular la estructura.

En 2006, Billinge y sus colaboradores demostraron la utilidad de la estrategia FDP al calcular, a partir de principios fundamentales, la estructura en forma de balón de fútbol de la molécula de 60 átomos de carbono (buckybola). Desde entonces, han desarrollado más algoritmos para reconstruir otras estructuras nanométricas.

Aunque el desarrollo de algoritmos resulta indispensable, Stephen Streiffer, del Centro para Materiales Nanométricos del Laboratorio Nacional de Argonne, señala que deben mejorarse también las técnicas de obtención de imágenes. El desideratum de la microscopía de rayos X sería poder colocar un nano-objeto bajo un haz de rayos X y conocer no sólo la forma nanoscópica, sino también la posición y la identidad química de cada átomo que lo integra.

Según Matthias Bode, también de Argonne, los métodos espectroscópicos, el estudio de materiales basado en la luz que absorben o emiten, será otra arma valiosa en el arsenal de técnicas de obtención de imágenes. La nanociencia suele buscar la relación entre la estructura y las propiedades que operan a escala nanométrica. La espectroscopía permitiría relacionar el tamaño o la forma de la partícula con propiedades electrónicas o magnéticas.

Resolver el problema de las nanoestructuras será la clave para alcanzar el objetivo último de la nanotecnia: nanomateriales diseñados a medida para funciones específicas.

Mark Wolverton

Fusión en una red bidimensional de vórtices superconductores

Se ha observado la transición de "sólido" a "líquido" de la red de vórtices de un superconductor. Un resultado clave para entender la física en dos dimensiones

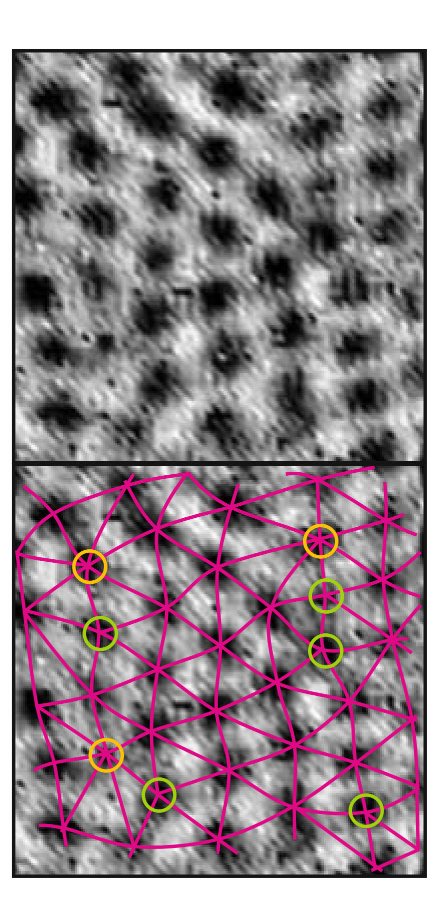
La superconductividad es un fenómeno fascinante que exhiben muchos materiales. Fue descubierta en 1911 por Heike Kamerlingh Onnes, quien observó que el mercurio dejaba de presentar resistencia al paso de una corriente eléctrica cuando se enfriaba por debajo de los 4,2 K. La formación del estado superconductor es un proceso muy complejo, cuya comprensión parcial ha costado a los físicos muchos años de trabajo. Hoy disponemos de una teoría microscópica que explica los aspectos más importantes de este estado singular de la materia; no obstante, muchas de sus propiedades quedan aún por esclarecer.

En general, al aplicar sobre un superconductor un campo magnético externo superior a cierto valor (característico para cada material), la resistencia se restaura y la superconductividad desaparece. Sin embargo, no todos los superconductores reaccionan del mismo modo ante el campo magnético externo. Lo más frecuente es que el campo penetre el material formando en su seno ciertas estructuras denominadas vórtices. Los vórtices son como pequeños imanes cilíndricos, idénticos entre sí y de radio nanométrico.

Todos los vórtices tienen en común la cantidad de flujo magnético que los atraviesa: exactamente un cuanto de flujo magnético. Esto implica que el número de vórtices aumenta con la intensidad del campo magnético aplicado.

Los vórtices se distribuyen por el material formando una red regular. El espacio que ocupan se encuentra en estado normal, mientras que el que dejan libre permanece superconductor. Obviamente, dicho espacio se reduce al aumentar el número de vórtices, por lo que, cuando están muy juntos, la superconductividad desaparece por completo [*véase* "Vórtices en superconductores", de M. P. González, J. Villegas, E. M. González y J. L. Vicent; Investigación y Ciencia, junio 2007].

Los vórtices en un superconductor poseen una dinámica propia. Pueden desplazarse e interaccionar unos con otros, así como con las inhomogeneidades presentes en el material y con las corrientes eléctricas que circulan por éste. Comprender bien la estructura de los vórtices, cómo se distribuyen, de qué forma se puede impedir o dificultar su movimiento y un sinfín más de cuestiones son temas de candente actualidad.



1. Fase hexática. El paso del sólido ordenado al líquido ocurre a través de una fase intermedia, la "fase hexática". La figura superior muestra una imagen de la red de vórtices obtenida mediante espectroscopía túnel a una temperatura de 1,6 K y bajo un campo magnético de 3 T. En la figura inferior se ha superpuesto la triangulación de la red (*líneas magenta*). Los puntos de intersección corresponden con las posiciones de los vórtices. Se observan numerosos corros de vórtices, caracterizados por parejas de corrillos con un vórtice en el centro rodeado por siete (*círculos naranjas*) y cinco (*círculos verdes*) vecinos próximos.

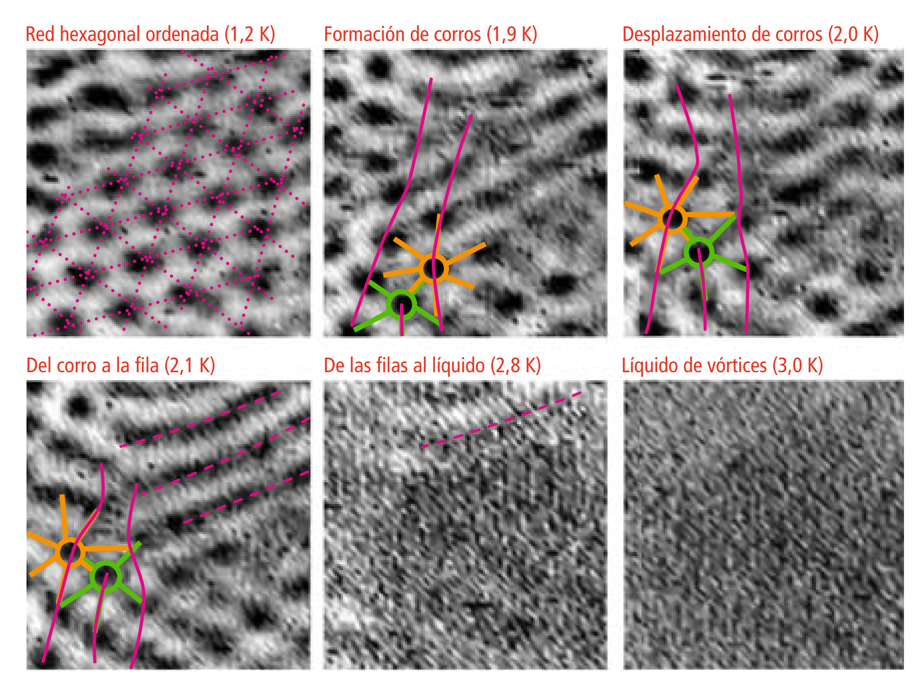
Vórtices y física en dos dimensiones

Muchos estudios sobre vórtices versan sobre los fenómenos originados por su comportamiento colectivo, en particular en las proximidades de la temperatura crítica superconductora, T_C. El interés por estos estudios se incrementó notablemente con el descubrimiento, en 1986, de los superconductores de alta temperatura. A muchos de ellos se les asocia un marcado carácter bidimensional; es decir, sus propiedades obedecen a modelos físicos que, idealmente, tienen lugar en un plano, no en las tres dimensiones habituales.

En particular, algunos de los resultados sobre las propiedades de estos superconductores en las proximidades de T_C se han relacionado con modificaciones en la estructura de su red de vórtices.

El comportamiento de los sistemas físicos bidimensionales ha interesado a los científicos desde hace tiempo. Sin embargo, se puede afirmar que ha estado más al alcance de la imaginación y del escrutinio de los físicos teóricos que al de la experimentación en el laboratorio. La principal dificultad radica en que es muy difícil acceder a un objeto manejable experimentalmente cuya física sea bidimensional.

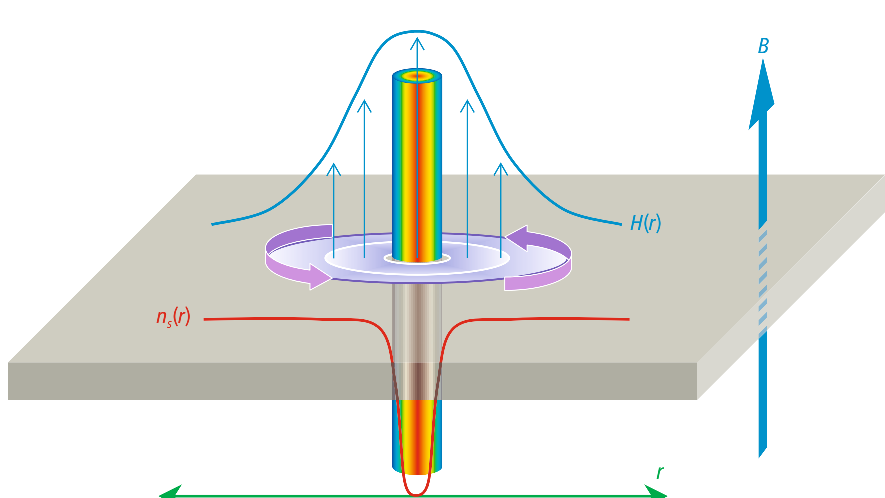
En un sólido cristalino tridimensional, una celda geométrica elemental se repite (idealmente) hasta el infinito. Al calentarse, su temperatura aumenta hasta alcanzar la temperatura de fusión (los 0 ºC en el caso cotidiano del hielo, por ejemplo). A partir de este momento, si seguimos calentando el sólido, su temperatura permanece constante, ya que el calor recibido se invierte en producir el colapso de la geometría de todo el edificio cristalino. La estructura termina por desaparecer y el sólido se funde.



2. Secuencia del proceso de fusión bajo un campo magnético de 2 T. Transición del "sólido" al "líquido" de vórtices al aumentar la temperatura.

Sin embargo, en dos dimensiones no parece haber esa "solidaridad" en la destrucción de la red. De acuerdo con las predicciones teóricas, la forma en la que se produce la fusión en dos dimensiones es muy diferente de la que tiene lugar en un sistema tridimensional. Se podría decir que es más amable. Existen argumentos teóricos muy firmes que prohíben el infinito de repeticiones, posible en tres dimensiones. Esos mismos argumentos se oponen a la destrucción solidaria, y han dado origen a una visión menos drástica del proceso de fusión.

La estructura regular de la red de vórtices en un superconductor permite considerarla como un "sólido bidimensional" de vórtices. Al aumentar la temperatura, se van creando defectos, las dislocaciones, que permanecen fijas, formando "corros" compuestos por parejas de corrillos de vórtices, hasta una temperatura a la que los corros se separan y comienzan su baile por la red. Esto da lugar a una "sopa", denominada fase hexática. Por fin, los corros sucumben en forma de "caldo de vórtices" hasta que, al seguir aumentando la temperatura, desaparecen y el sistema adopta el aspecto más prosaico de un conductor normal.



3. Vórtices en un superconductor. En la zona central de un vórtice, el material y sus electrones se encuentran en estado normal: la densidad de electrones superconductores $n_s(r)$ como función de la distancia *r* al centro del vórtice se hace nula en el centro. *B* representa el campo magnético externo, y *H*(*r*) el valor del campo en el seno del material.

Observación directa

En un trabajo de dos grupos españoles de Madrid y Zaragoza, publicado en agosto de 2009 en *Nature Physics* y cuya primera autora es Isabel Guillamón, del Laboratorio de Bajas Temperaturas de la Universidad Autónoma de Madrid, se ha observado directamente cómo se comporta la red de vórtices de una lámina superconductora muy fina de wolframio amorfo, un material con enorme potencial en el campo de la electrónica superconductora. El espesor nanométrico de la película y las propiedades superconductoras del material permiten considerar la red de vórtices como un sistema bidimensional.

Utilizando un microscopio de efecto túnel, fue posible obtener imágenes de la red desde temperaturas de algunas milésimas de grado por encima del cero absoluto hasta la temperatura crítica de la lámina. Las mediciones se hicieron a distintos campos magnéticos, lo que equivale a modificar la densidad de la red, es decir, el número de vórtices por unidad de área.

Guillamón y sus colaboradores han observado directamente la fenomenología predicha por la teoría de la fusión bidimensional en una red de vórtices superconductores. Empero, en ese divertido mundo no parecía posible descartar una sorpresa. Esta llegó antes de aparecer el "caldo" de vórtices, cuando éstos pasaron del corro a la fila, dando lugar a unas estructuras de rayas. Los autores han denominado a esta fase "cuasiesméctica", debido a cierta analogía con la fase esméctica de los cristales líquidos.

Tal incursión en la física en dos dimensiones ha permitido a este grupo de científicos sacar a la luz la rica fenomenología con que se produce la fusión. Según concluyen en su artículo, es de esperar que una fenomenología semejante se presente en la fusión de otros sistemas bidimensionales, tales como las membranas lipídicas celulares o las redes de vórtices en los superconductores de alta temperatura.

Hermann Suderow y **Sebastián Vieira**
Laboratorio de Bajas Temperaturas
Departamento de Física
de la Materia Condensada
Universidad Autónoma de Madrid

Superficie

Titán, el mayor satélite natural de Saturno, no debiera considerarse una luna más. Con una atmósfera más voluminosa que la de la Tierra, presenta una superficie de complejidad pareja

Ralph Lorenz y Christophe Sotin

CONCEPTOS BASICOS

- Con anterioridad a la misión Cassini-Huygens Titán constituía un misterio. Superior en tamaño a Mercurio, era la mayor extensión de terreno del sistema solar aún inexplorado.
- A partir de tomas en el infrarrojo, radares y una sonda, la misión ha descubierto un mundo dinámico lleno de ríos, lagos, dunas, montañas y quizá volcanes. Se trata de una versión gélida de la Tierra, donde el metano sustituye al agua, el agua reemplaza a las rocas del manto y los ciclos climatológicos duran centurias.
- El estudio de Titán ayuda a entender los procesos geológicos de nuestro propio planeta, como la formación de dunas y el cambio climático.

De no haber sabido que las imágenes procedían de Titán, habríamos pensado que se trataba de nuevas fotografías de Marte o de la Tierra. Desde la sala de control, algunos vieron en la mayor luna de Saturno la costa de California; otros pensaron en la Costa Azul. Tres semanas antes, la sonda Huygens se había desprendido de la nave espacial Cassini y había iniciado su descenso hacia la superficie de Titán. Todos los que en aquel momento nos encontrábamos observando sentíamos una extraña relación personal con la sonda. Habíamos trabajado en la misión durante gran parte de nuestras carreras, y nos preguntábamos cómo funcionaría todo en un mundo extraterrestre absolutamente desconocido.

La sonda alcanzó Titán la mañana del 14 de enero de 2005. En el Centro Europeo de Operaciones Espaciales de Darmstadt, las imágenes provocaron júbilo y sorpresa en igual medida. Nadie esperaba que el paisaje se pareciera tanto al terrestre. Mientras la sonda Huygens descendía, las fotos aéreas mostraron un entramado de ríos con los que se cruzaban torrentes alimentados por la lluvia. La sonda aterrizó en un lugar húmedo y lleno de guijarros sobre el que había caído una copiosa lluvia. Lo más extraño de Titán era su inquietante familiaridad.

Ahora, varios años después, hemos tenido tiempo de analizar los datos aportados por Huygens y de contextualizarlos con la imagen que Cassini, en órbita alrededor de Saturno, nos ha proporcionado tras haber sobrevolado Titán más de 60 veces. Por su tamaño (mayor que Mercurio), dinamismo (más activo que Marte) y atmósfera (más gruesa que la de la Tierra), Titán es un planeta en toda regla. Una amplia gama de procesos geológicos moldean su superficie. El metano desempeña la función del agua en la Tierra: se evapora, forma nubes, precipita, excava valles y fluye de nuevo hacia los lagos. Si su atmósfera no careciese de oxígeno y su temperatura no descendiese hasta los –180 ºC, Titán no sería tan distinto de nuestro planeta.

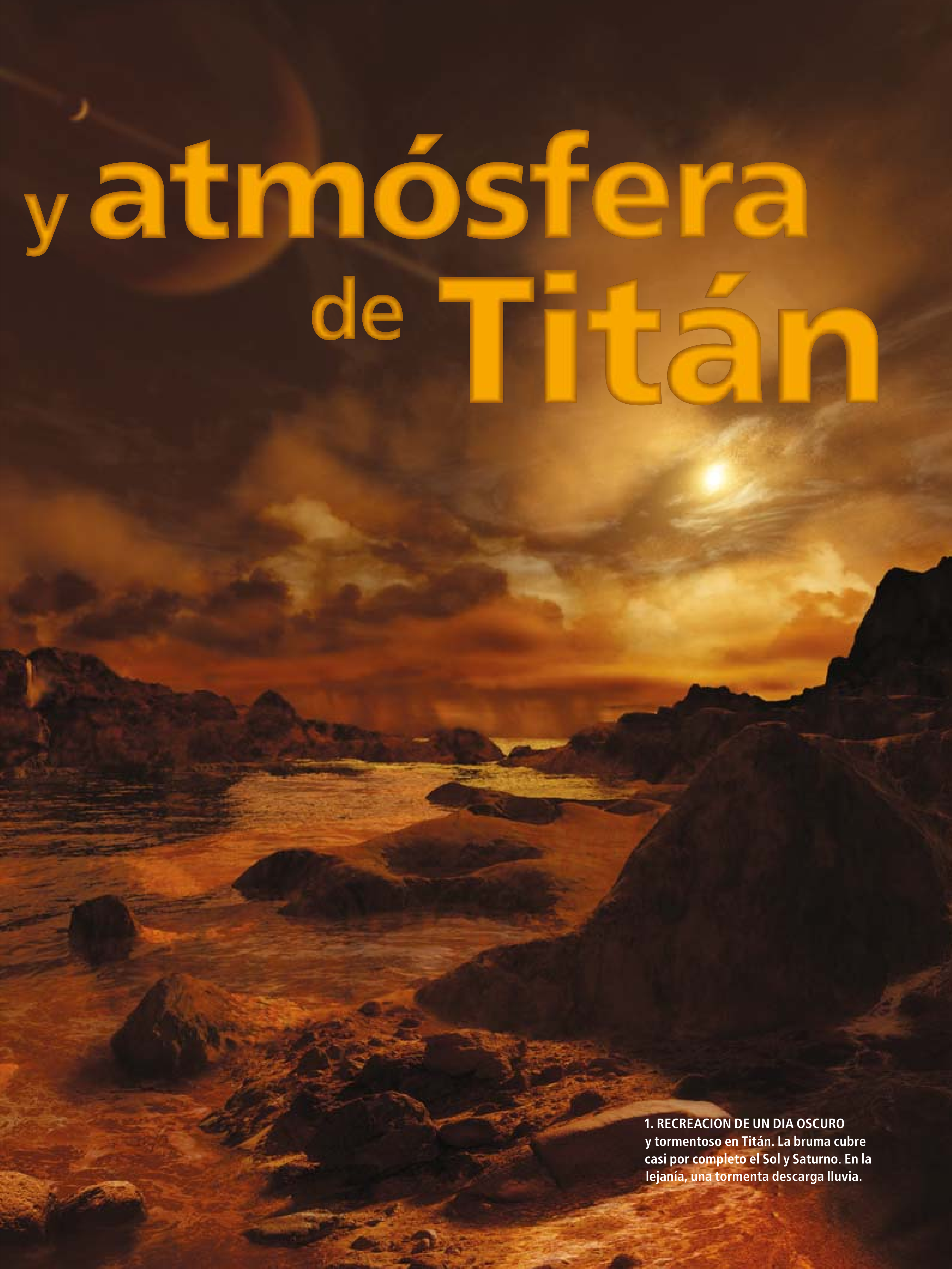
Mares de arena y mares de metano

Con anterioridad a las exploraciones de Cassini, nuestra visión de Titán era extremadamente simple. Cuando en 1980 y 1981 la sonda Voyager lo sobrevoló, sólo apreció una bola anaranjada cubierta de niebla. Ya a mediados del decenio de los noventa, el mejor resultado recabado por los observatorios no pasaba de un mapa en el infrarrojo con poco más que algunas regiones brillantes y otras más oscuras [*véase* “Cassini-Huygens en Saturno”, por Jonathan I. Lunine; Investigación y Ciencia, septiembre 2004]. Se hablaba de la superficie o de la atmósfera de Titán sin distinguirlas. Sin embargo, todas esas vaguedades desaparecieron con el aluvión de datos aportados por la misión Cassini-Huygens. Ahora podemos referirnos con precisión a los mares de arena de las latitudes bajas, la atmósfera veraniega sobre el polo norte o un día nublado en la región de los lagos meridionales.

Las zonas de latitudes bajas en Titán presentan una mezcla de colinas irregulares y brillantes (entre las que destaca la vasta área denominada Xanadú) y mares oscuros de arena, de los que en el pasado se creía que eran mares líquidos. (Los astrónomos suelen llamar “mar” a toda región oscura; los mares de la

RON MILLER

y atmósfera de Titán



1. RECREACION DE UN DIA OSCURO y tormentoso en Titán. La bruma cubre casi por completo el Sol y Saturno. En la lejanía, una tormenta descarga lluvia.

Luna son el ejemplo más obvio.) Dunas de arena de unos 100 metros de altura, equiparables a las mayores de la Tierra, se extienden a lo largo de decenas o cientos de kilómetros. La arena de Titán no se compone de silicatos, como el cuarzo terrestre, sino de hidrocarburos. Presenta un color oscuro, por lo que su aspecto recuerda a los posos del café.

En las regiones polares encontramos hidrocarburos líquidos, ya sea en fosas hondas de pocas decenas de kilómetros de diámetro, en lagos someros y más extensos (como el *lacus* Ontario, algo mayor que su homónimo terrestre) o mares (como el *mare* Kraken, de la extensión del Caspio). Sus respectivos niveles de superficie parecen haber cambiado con el paso del tiempo. Entre los trópicos desérticos y las húmedas regiones polares se hallan las inescrutables latitudes medias, con paisajes muy erosionados e indicios de corrientes.

Después de que el Voyager lo sobrevolase por primera vez, ya se sospechaba que Titán quizá contase con un ciclo de metano (nubes, lluvia y mares) parecido a los ciclos hidrológicos de la Tierra. Esta especulación se basaba en un dato: la temperatura de la superficie rondaba la del punto triple del metano, al igual que la temperatura de la Tierra se aproxima a la del punto triple del agua (0,01 grados Celsius). A esta temperatura la fase gaseosa, la sólida y la líquida pueden coexistir. ¿Quería decir esto que las transiciones entre los tres distintos estados regulaban la temperatura de Titán, o se trataba de una mera coincidencia?

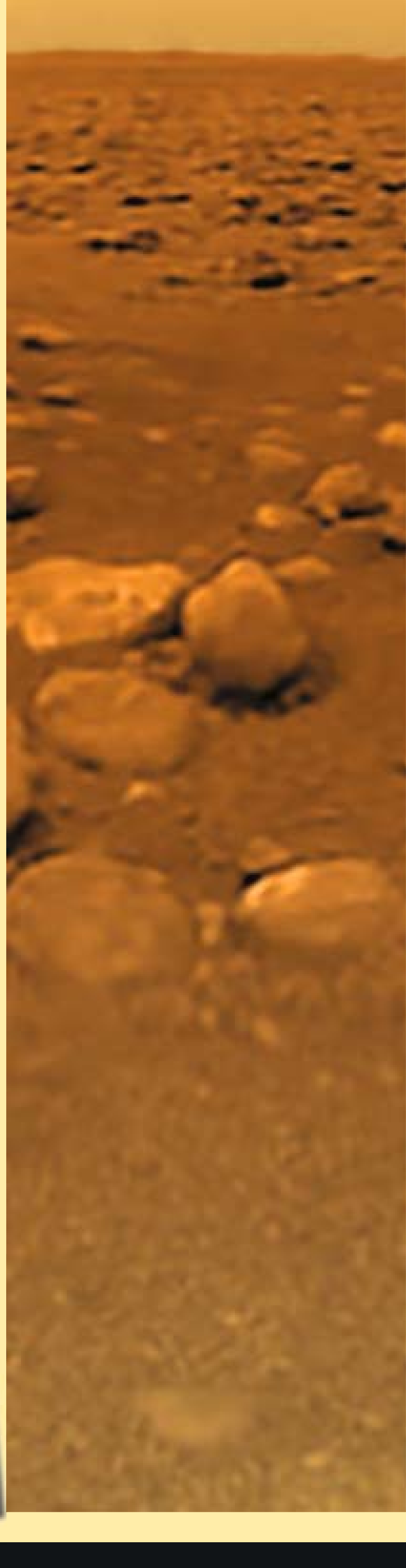
La primera prueba de que la idea podía tener sentido llegó a finales de los noventa, cuando los telescopios terrestres detectaron nubes transitorias justo a la altura a la que se esperaba que el metano condensase. Las subsiguientes mejoras en las observaciones telescópicas, así como las imágenes obtenidas por Cassini, lograron finalmente dar cuenta de la actividad de estas nubes: ascendían igual que los cúmulos terrestres para disiparse después en pequeñas gotas de lluvia. Desde lo alto, la nave Cassini ha observado zonas que se tornaban más oscuras tras haber sido sobrevoladas por nubes, algo que bien podría deberse a la caída de lluvia.

Aunque Cassini no ha detectado directamente las precipitaciones, las fotografías aéreas de la sonda Huygens no dejan lugar a dudas de que hay paisajes en Titán que han sido moldeados por la lluvia y por el fluir de corrientes sobre su superficie. El punto de aterrizaje de la sonda se encontraba a unos 10 grados al sur del ecuador, al borde de unas colinas heladas y brillantes situadas en medio de un vasto mar de arena. Las imágenes mostraban un par de dunas largas y lejanas, si bien la

ESA/NASA/JPL/UNIVERSIDAD DE ARIZONA (*lugar del aterrizaje*); NASA/JPL/INSTITUTO DE CIENCIAS DEL ESPACIO (*Titán y dunas de arena en la región de Belet*); FUENTE: CENTRO NACIONAL DE CIENCIAS Y OBSERVACION DE RECURSOS TERRESTRES DEL USGS Y OFICINA DE LA NASA DEL PROYECTO LANDSAT (*dunas del desierto del Namib*); NASA/JPL/USGS (*mapa de la región polar*); NASA/JPL/UNIVERSIDAD DE ARIZONA/DLR (*reflejo solar en el mare Kraken*); NASA/JPL (*detalle del mare Kraken*); NASA/JPL/ESA/UNIVERSIDAD DE ARIZONA (*detalle de valles fluviales*)

Un viaje por Titán

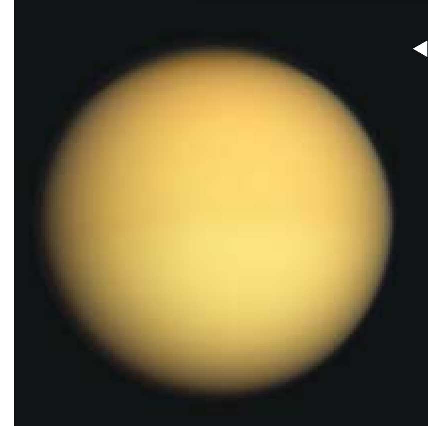
La nave orbital Cassini y la sonda descendente Huygens nos han ofrecido la primera visión real de la superficie de Titán, la más rica del sistema solar en su diversidad.



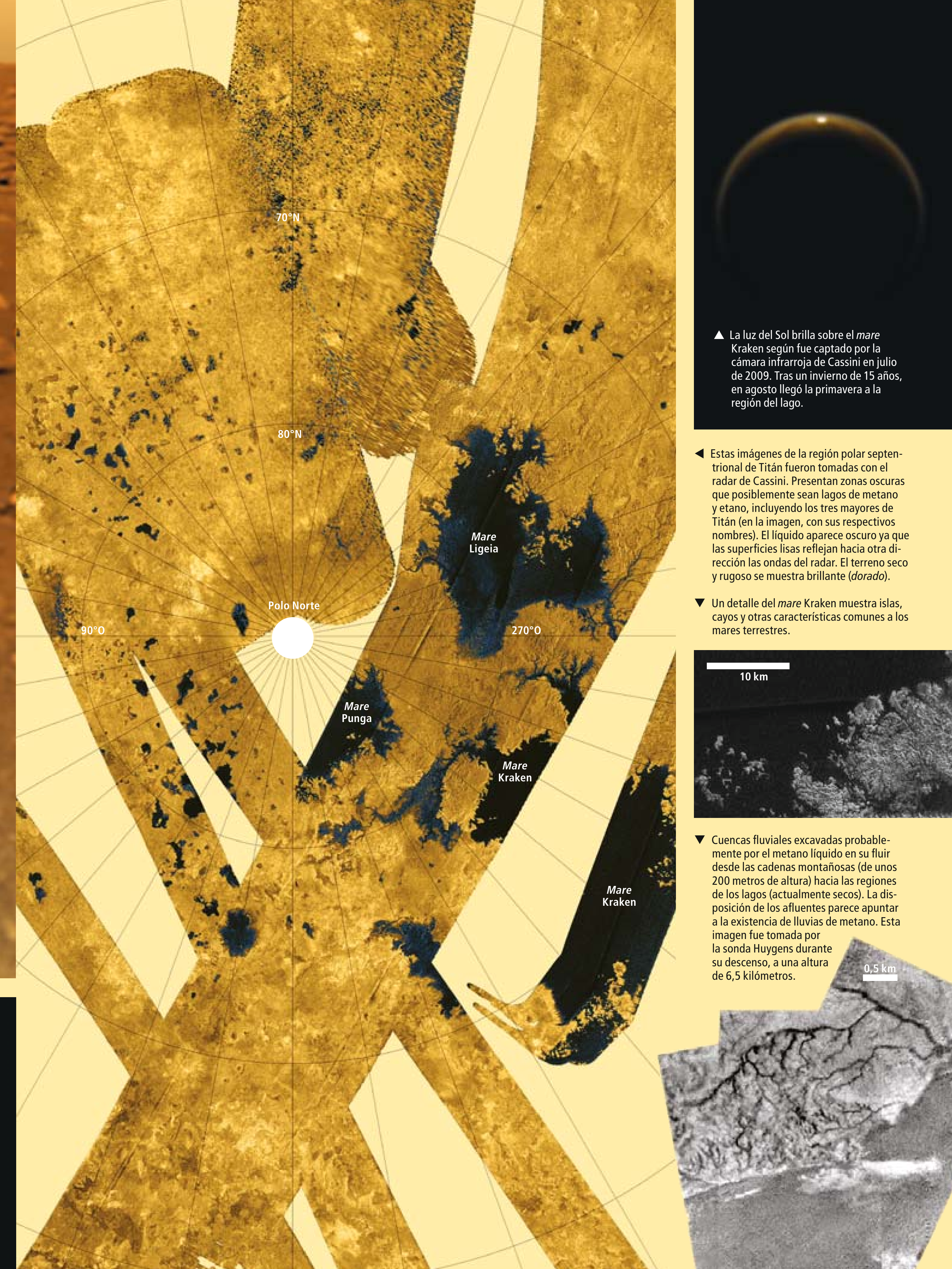
▶ Huygens observó un paisaje cubierto de pedazos de hielo del tamaño de un puño esparcidos sobre la arena húmeda. Su forma redondeada sugiere una erosión provocada por un fluido, presumiblemente metano.

▼ Las dunas de arena de la región de Belet aparecen en forma de surcos oscuros en las imágenes del radar. Con una longitud de entre decenas y cientos de kilómetros, se orientan paralelamente a la dirección media del viento. Se cree que su arena consta de moléculas de hidrocarburos. A pesar de tan curiosa composición, las dunas exhiben el mismo espaciado y tamaño que las mayores dunas de la Tierra, como las del desierto del Namib (*recuadro interior*). El fenómeno podría obedecer a que la capa limítrofe de la atmósfera (la capa inferior del aire, turbulenta), presenta el mismo grosor en ambos mundos.





◀ **TITAN ANTES DE LA LLEGADA DE CASSINI**
En el año 1980, los científicos de la misión Voyager 1 tuvieron que decidir entre sobrevolar Titán o apuntar a un encuentro posterior con Plutón. Aunque escogieron Titán, todo lo que observaron fue una bruma sin estructuras, una "borrosa pelota de tenis sin costuras" en palabras de Tobías Owen, miembro del equipo [*véase* "Titán", por Tobías Owen; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril 1982]. Aunque las imágenes fuesen algo decepcionantes, las observaciones en el ultravioleta, el infrarrojo y en ondas de radio del Voyager 1 indicaron que la atmósfera estaba compuesta sobre todo de nitrógeno y que se daban condiciones adecuadas para la existencia de nubes de metano, lluvia e incluso océanos. Algo interesante parecía esconderse tras la niebla.



▲ La luz del Sol brilla sobre el *mare* Kraken según fue captado por la cámara infrarroja de Cassini en julio de 2009. Tras un invierno de 15 años, en agosto llegó la primavera a la región del lago.

◀ Estas imágenes de la región polar septentrional de Titán fueron tomadas con el radar de Cassini. Presentan zonas oscuras que posiblemente sean lagos de metano y etano, incluyendo los tres mayores de Titán (en la imagen, con sus respectivos nombres). El líquido aparece oscuro ya que las superficies lisas reflejan hacia otra dirección las ondas del radar. El terreno seco y rugoso se muestra brillante (*dorado*).

▼ Un detalle del *mare* Kraken muestra islas, cayos y otras características comunes a los mares terrestres.

▼ Cuencas fluviales excavadas probablemente por el metano líquido en su fluir desde las cadenas montañosas (de unos 200 metros de altura) hacia las regiones de los lagos (actualmente secos). La disposición de los afluentes parece apuntar a la existencia de lluvias de metano. Esta imagen fue tomada por la sonda Huygens durante su descenso, a una altura de 6,5 kilómetros.



2. EL MAPA GLOBAL de Titán se ha ido construyendo poco a poco con la cámara principal de Cassini, que observa en el infrarrojo cercano, y se ha completado con una cobertura parcial tomada con radar (*dorado, arriba*). Se observa una variación general del terreno con la latitud, así como una escasez de cráteres de impactos (*naranja, abajo*), señal de que la geografía actual de la superficie es joven en términos geológicos.

zona circundante se asemejaba más a una vaguada cubierta de piedras redondeadas y esparcidas sobre la arena. Un penetrómetro diseñado y construido por uno de los autores (Lorenz) excavó en la tierra. Halló que ésta era suave y adherente, similar a la arena mojada o a la arcilla.

Los termómetros indicaron que el calor escapaba de la sonda tan rápidamente que el suelo debía de estar mojado; a la manera en que sentimos más fría la mano cuando la introducimos en arena húmeda que cuando lo hacemos en arena seca. Las investigaciones recientes sugieren que el vapor de metano pudo haber condensado en el exterior de la cámara. De hecho, una de las imágenes muestra el patrón característico que deja la luz cuando es reflejada por una gota que cae. En su caso, se trataría del primer enfoque cercano al líquido de un mundo extraterrestre.

Un planeta al límite

El ciclo hidrológico representa en Titán lo que el efecto invernadero en Venus: un proceso terrestre llevado al extremo. En la Tierra, la energía que recibimos del Sol alcanza para evaporar cerca de un metro de agua al año. Pero la atmósfera puede acumular sólo un par de centímetros antes de formar nubes y volver a condensar el agua; por ello, el clima terrestre se caracteriza por precipitaciones que descargan, de media, en torno a dos centímetros de agua por semana.

En Titán, la débil luz del Sol evapora sólo un centímetro al año. Sin embargo, su atmósfera logra acumular el equivalente a 10 metros de líquido en estado gaseoso. Esto genera lluvias torrenciales, causantes de riadas e inundaciones a las que siguen siglos de sequía. Los altibajos climatológicos en Titán suponen una versión extrema de lo que podría ocurrir en la Tierra como consecuencia del calentamiento global: al aumentar la temperatura, aumenta también la capacidad de la troposfera para almacenar humedad, razón de la mayor intensidad de lluvias y sequías. El punto de aterrizaje de la sonda Huygens fue, probablemente, el escenario de una inundación repentina. Lo que no sabemos es si ésta tuvo lugar un mes o un milenio antes del aterrizaje.

En la Tierra, el clima tropical está dominado por la célula de circulación de Hadley, que comienza cuando el aire caliente de las latitudes ecuatoriales asciende y emprende su fluir hacia los polos. No obstante, el efecto de la rotación del planeta impide que complete su recorrido, y a una latitud de en torno a los 30 grados desciende de nuevo a la superficie. Dado que el aire descendente es seco,

la mayoría de los desiertos terrestres se hallan en dichas latitudes.

En el caso de Titán, su rotación es mucho más lenta (una revolución cada 15 días), lo que implica que su efecto sobre el esquema de circulación análogo es menor. De hecho, el aire consigue llegar hasta los fríos polos. Esta circulación, más larga, reseca completamente la zona ecuatorial y da lugar a los extensos mares de arena presentes en la región.

Aunque mucho más fría, la atmósfera de Titán cuenta con un perfil de temperaturas similar al de la Tierra. La troposfera se calienta por efecto invernadero, de modo que en esta capa las temperaturas disminuyen con la altura. Por encima se encuentra la estratosfera, calentada por la absorción de la radiación solar. En la Tierra, el absorbente es el ozono; en Titán, este papel lo ejerce la bruma opaca que envuelve al satélite. Encontramos así otro ejemplo de un tema recurrente en Titán: una física familiar con sustancias exóticas.

Para analizar la bruma, Cassini ha explorado la alta atmósfera a una altitud de unos 1000 kilómetros. Con anterioridad a los datos de Cassini, se pensaba que la bruma debía estar compuesta por hidrocarburos de peso molecular relativamente bajo, como el etano, con un peso molecular de 30. Sin embargo, la nave espacial ha detectado una drástica e inesperada abundancia de moléculas orgánicas pesadas, como benceno, antraceno y otras macromoléculas con pesos superiores a 2000. El origen de estos compuestos obedece al efecto de la luz solar sobre el metano atmosférico. Se cree que las sustancias en cuestión condensan y dan lugar a los granos de gran tamaño que acaban por depositarse sobre la superficie y crean los mares de arena. Los detalles del proceso, sin embargo, se desconocen.

NASA/JPL/INSTITUTO DE CIENCIAS DEL ESPACIO (*reconstrucción de la superficie*); NASA/JPL/CALTECH/UNIVERSIDAD DE ARIZONA/ EQUIPO DE FORMACION DE IMAGENES DE CASSINI (*mapa global*); KEVIN HAND (*sección transversal*)

Cataclismos periódicos

Además de un ciclo hidrológico corto regido por los efectos de la energía solar, la Tierra cuenta con otro ciclo más largo, que obedece a la tectónica de placas y que regula el intercambio de agua entre el interior y la superficie. A lo largo de cientos de millones de años, el agua es expulsada desde el interior a través de las erupciones volcánicas y las dorsales oceánicas, para regresar después al interior en las zonas de subducción de placas, es decir, las regiones donde las placas tectónicas chocan y se hunden. De no ser por ese ciclo, toda el agua se habría acumulado en la atmósfera y habría acabado por escapar al espacio.

¿Qué sucede en Titán? En las capas altas de la atmósfera, las reacciones fotoquímicas transforman el metano en compuestos orgánicos pesados. Pero esta conversión transcurre con celeridad tal que, de no ser repuesto, el metano de la atmósfera y de la superficie tendría que haber desaparecido en pocos millones de años [*véase* "El metano en Marte y Titán", por Sushil K. Atreya; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 2007]. Por consiguiente, Titán debe contar no sólo con reservas subterráneas de metano, sino también con algún mecanismo que reinyecte el gas a la atmósfera; es decir, con algún análogo del ciclo hidrológico de larga duración de la Tierra.

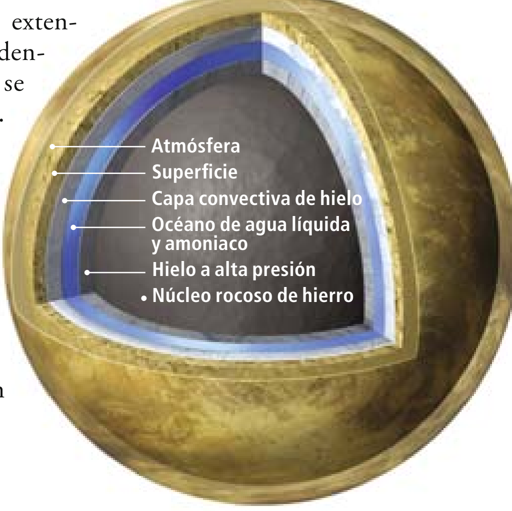
Cassini no ha sido testigo de ningún volcán ni de indicios que apunten a una tectónica de placas. Pero sí ha descubierto al menos dos regiones que parecen ser flujos volcánicos congelados: el *arcus* ("región con forma de arco") Hotei y el *regio* ("región extensa") Tui (por convenio, los accidentes geográficos extraterrestres se denotan con nombres latinos). En el infrarrojo cercano, estas zonas se muestran más brillantes que ninguna otra, señal de una composición diferente. El material causante del brillo quizá sea una capa de dióxido de carbono o de amoniaco helado producto de una erupción, aunque su composición y origen siguen siendo un misterio.

Los autores

Ralph Lorenz trabaja en el Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins. Ayudó a diseñar y construir la sonda Huygens, realizó los primeros mapas de Titán a partir de las observaciones del Telescopio Espacial Hubble y dirigió el equipo que planeó las observaciones de radar que Cassini efectuó sobre Titán. **Christophe Sotin** es investigador del Laboratorio de Propulsión a Chorro del Instituto de Tecnología de California. Ha participado en la realización y análisis de las observaciones espectroscópicas de Cassini en el visible y en el infrarrojo.

HUMEDO POR DENTRO

La densidad de Titán indica que el satélite es mitad roca (el núcleo) y mitad agua (el manto y la corteza), con un revestimiento de hidrocarburos. Los modelos predicen que los 50 kilómetros superiores de hielo son lo suficientemente templados y maleables como para experimentar una convección lenta. Puede que debajo de esa capa haya un océano de agua líquida mezclada con amoniaco; el mar podría alcanzar una profundidad de cientos de kilómetros y haber sido aún más profundo en el pasado. Se ha especulado con la posibilidad de que albergue vida.



Otra prueba de actividad geológica nos la ofrece la ausencia de cráteres de meteoritos, carencia que apunta a que la actividad volcánica u otros procesos similares han debido aplanar la superficie. Basándose en las estimaciones sobre el ritmo esperado de impactos, se calcula que la superficie de Titán, tal y como la conocemos hoy, ha de contar con una antigüedad de entre 200 y 1000 millones de años.

La ausencia de tectónica de placas en Titán parece indicar que sus ciclos internos no transcurren de manera continua, como en la Tierra, sino intermitentemente. De acuerdo con una de las propuestas para reconstruir la historia de Titán, su interior liberó metano a la atmósfera en tres períodos: durante la formación del satélite, hace 4500 millones de años; al comenzar la convección en el núcleo, hace 2500 millones de años, y al inicio de la convección del manto de hielo, en los últimos 1000 millones de años.

El último episodio mencionado habría desatado una cadena de erupciones volcánicas que habrían allanado toda la superficie; algo parecido al cataclismo que sufrió Venus hace unos mil millones de años [*véase* "Cambio climatológico global en Venus", por Mark A. Bullock y David H. Grinspoon; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo 1999]. Inmediatamente después de esta inyección de metano, la superficie pudo haber estado incluso más húmeda que en la actualidad. Entre estos períodos de intensa actividad, la actividad tectónica de Titán habría sido prácticamente nula. Este modelo no sólo explica la escasa densidad de cráteres, sino también la detallada composición isotópica de la atmósfera.

Además de las reservas interiores de metano, en Titán podría haber también un océano subterráneo de agua líquida. Así lo predicen los modelos matemáticos que detallan la evolución interior del satélite. Las pruebas efectuadas por Huygens apuntan a una capa de material eléctricamente conductor, situada a unos 45 kilómetros por debajo de la superficie; el candidato más obvio es el agua. Además, las mediciones con radar de Cassini parecen indicar que la corteza gira más rápidamente que el núcleo; algo que podría explicarse si una capa líquida intermedia amortiguase el contacto entre ambas partes, posibilitando que cada una gire a ritmos diferentes. No obstante, las interpretaciones recientes de estos mismos datos ponen en duda esta conclusión.

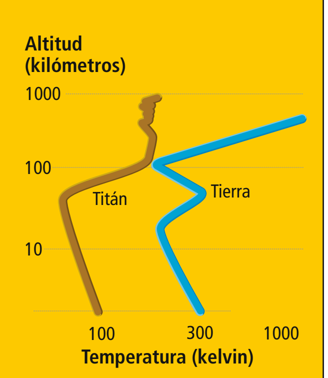
Desafortunadamente, la atmósfera de Titán impide que Cassini se aproxime más a su superficie para buscar el campo magnético secundario que Saturno podría inducir en un océano. Estos campos resultaron cruciales al estudiar los océanos en los satélites jovianos [*véase* "El océano oculto de Europa", por Robert T. Pappalardo, James W. Head y Ronald Greeley; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre 1999]. Aún se debate si este campo secundario podría detectarse. Con vistas al próximo decenio se han diseñado diferentes estrategias para detectar su señal magnética, así como distorsiones en el campo gravitatorio de Titán que pudiesen ser reveladoras al respecto.

Edades de hielo en Titán

Además de un ciclo de cambios estacionales y de los reabastecimientos atmosféricos dictados por las eras geológicas, Titán y la Tierra experimentan cambios climáticos periódicos. Estos se suceden en escalas de tiempo variables que van de las decenas de miles a los millones de años. Tal y como descubrió James Croll en el

COMO LA TIERRA, PERO MAS FRIO

La atmósfera de Titán, al igual que la de la Tierra, tiene una troposfera (la capa inferior, dinámica y con actividad climática) y una estratosfera (una capa estable calentada por la radiación ultravioleta del Sol). Estas y otras capas se definen en función de la tasa de cambio de la temperatura con la altura (*derecha*). La atmósfera de Titán, unos 200 grados más fría que la terrestre, presenta una mayor extensión vertical, consecuencia de la menor gravedad del satélite. Las numerosas capas de neblina, compuesta por partículas de hidrocarburos (similares a las del humo industrial), desempeñan el mismo papel que la capa de ozono en la Tierra.





LUCY READING-IKKANDA (*gráfico de temperaturas*); KEVIN HAND (*atmósferas de Titán y de la Tierra*)

TEMPESTADES DE METANO

En Titán, el metano experimenta un ciclo corto (*negro*) muy parecido al del agua en la Tierra. Además, a lo largo de las eras geológicas, se desarrollan episodios de flujos unidireccionales de metano desde las reservas subterráneas hacia la alta atmósfera (*blanco*). Allí, la radiación solar transforma el metano en etano e hidrocarburos pesados, que dan lugar a la bruma característica de Titán. Sus partículas se depositan posteriormente sobre la superficie.



Nubes de metano sobre la región polar meridional

siglo XIX, y como a principios del XX detallaría Milutin Milanković, las fuerzas gravitatorias ejercidas por los planetas alteran lentamente la inclinación y la órbita de la Tierra. El fenómeno modifica la intensidad de calor recibido del Sol y origina edades de hielo cíclicas.

Como consecuencia de la excentricidad de la órbita elíptica de Saturno (y, por tanto, de la de Titán) alrededor del Sol, el verano en el sur es más corto pero más intenso que en el norte. Es posible que esta asimetría induzca un bombeo de compuestos volátiles (como metano y etano) desde el hemisferio meridional hacia el septentrional, lo que explicaría la mayor abundancia relativa de lagos y mares en la región norteña. Pero la alineación relativa entre el eje polar de Titán y la órbita elíptica de Saturno cambia lentamente. Dentro de unos 30.000 años, el verano en el norte será el más intenso, sus lagos se secarán y aparecerán otros nuevos en el sur.

Los hallazgos de Cassini, que muestran un mundo familiar a la par que exótico, nos obligan a revisar nuestra propia imagen de la Tierra. Por ejemplo, las áreas de Titán con dunas de arena se asemejan a las de los desiertos del Namib o del Sahara, donde las dunas se disponen a lo largo de la dirección resultante de las dos corrientes principales de vientos. Sin embargo, las simulaciones atmosféricas de Titán presentan problemas a la hora de reproducir la orientación de sus dunas. Aunque cabe que los vientos en Titán se hallen controlados por efectos desconocidos, quizás esta discrepancia se deba a que aún no comprendemos del todo los procesos de formación de dunas.

Otro ejemplo lo constituyen los lagos de Titán. Carecen de olas, a pesar de que una gravedad menos intensa y un aire más espeso deberían incrementar el oleaje. ¿Qué implicaciones puede tener ese fenómeno para nuestra comprensión de la generación de olas por el viento? Otro efecto atañe a la velocidad de rotación de Titán, que cambia ligeramente con las estaciones debido a que la atmósfera y la superficie se aceleran y se frenan entre sí. Aunque mucho más débil, el efecto se ha observado también en la Tierra.

Como suele ser frecuente en el caso de las exploraciones planetarias, los hallazgos de Cassini arrojan preguntas aún más profundas. La rica variedad de problemas que plantea Titán y las complejas interacciones entre su superficie y su atmósfera requerirán, en última instancia, más misiones (como el programa de la NASA para Marte) que incluyan vehículos de superficie e incluso globos. Mientras tanto, Cassini continúa sobrevolando Titán cada pocas semanas. En agosto de 2009 tuvo lugar el equinoccio primaveral en el hemisferio norte del satélite. A medida que el Sol continúe progresivamente su ascenso hacia el norte, la circulación atmosférica y el comportamiento de las nubes cambiarán ante nuestros propios ojos. Cuando las regiones polares septentrionales comiencen a calentarse, lo único que podremos pronosticar será lo inesperado.

Bibliografía complementaria

EPISODIC OUTGASSING AS THE ORIGIN OF ATMOSPHERIC METHANE ON TITAN. Gabriel Tobie, Jonathan I. Lunine y Christophe Sotin en *Nature*, vol. 440, págs. 61-64; 2 de marzo de 2006.

TITAN UNVEILED: SATURN'S MYSTERIOUS MOON EXPLORED. Ralph Lorenz y Jacqueline Mitton. Princeton University Press, 2008.

TITAN: EXPLORING AN EARTHLIKE WORLD. Athena Coustenis y Fredric W. Taylor. World Scientific, 2008.

RIVERS, LAKES, DUNES, AND RAIN: CRUSTAL PROCESSES IN TITAN'S METHANE CYCLE. Jonathan I. Lunine y Ralph D. Lorenz en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 37, págs. 299-320; mayo de 2009.

TITAN FROM CASSINI-HUYGENS. Dirigido por Robert H. Brown, Jean-Pierre Lebreton y J. Hunter Waite. Springer, 2009.

NASA/JPL/UNIVERSIDAD DE ARIZONA/UNIVERSIDAD DE NANTES (*nubes de metano*); KEVIN HAND (*ciclo del metano*)

La red neuronal (por defecto)

Las regiones del cerebro que persisten activas cuando la mente divaga distraída pueden encerrar la clave para comprender los trastornos neurológicos y la propia consciencia

Marcus E. Raichle

Imagínese que está a punto de quedarse dormido en la tumbona de su terraza, con una revista en el regazo. De repente, una mosca se posa en su brazo. Usted agarra la revista y aplasta el insecto. ¿Qué estaba pasando en su cerebro después de que se posara la mosca? ¿Y qué estaba pasando justo antes? Durante mucho tiempo, la mayoría de los neurólogos han supuesto que buena parte de la actividad neural que se desarrolla en el cerebro cuando uno se halla descansando se corresponde con un estado de abatimiento, de somnolencia. Desde ese punto de vista, la actividad del cerebro en reposo no es más que un ruido aleatorio, parecido a la nieve que aparece en la pantalla del televisor cuando la cadena ha dejado de emitir. Por tanto, cuando la mosca se posa en su antebrazo el cerebro se centra en la tarea consciente de aplastar al bicho.

Pero ciertos análisis recientes llevados a cabo mediante técnicas de formación de imágenes han revelado algo bastante sorprendente: en el cerebro de una persona tumbada sin hacer nada se está llevando a cabo una cantidad notable de actividad significativa.

Cuando nuestra mente se encuentra en reposo (cuando soñamos despiertos en un sillón, dormimos en la cama o se nos ha anestesiado para una operación quirúrgica), ciertas áreas dispersas del cerebro mantienen una intensa interacción. La energía consumida durante ese incesante intercambio de mensajes, al que se le ha denominado modo operativo por defecto del cerebro, multiplica por veinte la invertida por el cerebro cuando responde de manera consciente ante una mosca incordiante o ante otro estímulo externo.

De hecho, la mayoría de las cosas que acometemos de manera consciente —por ejemplo, sentarnos a cenar o a dictar una conferencia—, representan un abandono de la actividad basal del cerebro cuando funciona en el modo operativo por defecto.

Para comprender el modo operativo por defecto del cerebro, ha resultado clave el descubrimiento de un sistema desconocido, al que se ha denominado red neuronal por defecto (RND). Aunque se investiga cuál sería el papel exacto de la RND a la hora de organizar la actividad neural, cabe la posibilidad de que orqueste el modo en que el cerebro organiza los recuerdos y diversos sistemas que necesitan cierta preparación ante futuros sucesos. El sistema motor del cerebro tiene que estar funcionando a un número de revoluciones adecuado de manera que esté listo para el momento en que note el cosquilleo de una mosca en el brazo.

La RND puede desempeñar un papel crucial en la sincronización de todas las regiones del cerebro; a la manera de los participantes en una competición atlética, las regiones implicadas deben encontrarse en posición de "listas" para cuando se produzca el pistoletazo de salida. Si la RND prepara al cerebro para la actividad consciente, las investigaciones sobre su comportamiento pueden revelar las claves para comprender la naturaleza de la experiencia consciente. Los neurólogos tienen razones para sospechar que, además, las alteraciones

CONCEPTOS BASICOS

- Durante mucho tiempo, los neurólogos creían que los circuitos del cerebro se desconectaban cuando una persona se hallaba en reposo.
- Sin embargo, los estudios de neuroimagen han demostrado que hay un nivel persistente de actividad basal.
- El denominado modo operativo por defecto puede ser fundamental a la hora de planificar futuras acciones.
- La existencia de interconexiones defectuosas en las regiones del cerebro implicadas en el modo operativo por defecto puede provocar trastornos que abarcan desde la enfermedad de Alzheimer hasta la esquizofrenia.

JEAN-FRANCOIS PODEVIN



de la RND pueden ser la causa subyacente de errores mentales, lo mismo sencillos que una serie de complejos trastornos cerebrales y que abarcan de la enfermedad de Alzheimer a la depresión.

La energía oscura, a prueba

La idea de que el cerebro podría estar constantemente ocupado no es nueva. Uno de los primeros en proponerla fue Hans Berger, inventor del electroencefalograma, que registra la actividad eléctrica del cerebro mediante un gráfico conformado por un conjunto de líneas onduladas. En los artículos científicos publicados en 1929 y que sentaron un precedente, Berger llegó a la conclusión, a partir de las incesantes oscilaciones eléctricas detectadas por su dispositivo, que "el sistema nervioso central debe de hallarse siempre, y no sólo en vigilia, en un estado de actividad considerable".

Pero sus ideas sobre el funcionamiento del cerebro fueron ignoradas durante mucho tiempo, incluso después de que los métodos no invasivos para la obtención de imágenes se hubiesen convertido en rutina de cualquier laboratorio de neurociencias. Primero surgió, a finales de los años setenta, la tomografía por emisión de positrones (TEP), que mide el metabolismo de la glucosa, el flujo sanguíneo y el consumo de oxígeno, para hacer una estimación de la actividad neuronal. Posteriormente, en 1992, apareció la técnica de resonancia magnética funcional (RMf), que mide, con el mismo propósito la oxigenación del cerebro.

Las técnicas señaladas bastan para determinar la actividad del cerebro, se concentre ésta o no en una tarea. Pero, sin percatarse de ello, el diseño de la mayoría de los estudios llevó a pensar que la mayoría de las regiones del cerebro permanecían bastante tranquilas hasta que se las requería para emprender alguna tarea específica.

En condiciones normales, los neurólogos que aplican técnicas de neuroimagen tratan de localizar las regiones del cerebro asociadas a una percepción o un comportamiento concreto. Los mejores diseños experimentales para definir estas regiones se limitan a comparar la actividad cerebral durante dos situaciones relacionadas. Por ejemplo, si los investigadores quisieran observar qué regiones del cerebro resultan importantes mientras se leen palabras en voz alta (la situación de "prueba") y compararlas con lo que ocurre cuando se observan las mismas palabras en silencio (la situación de "referencia"), buscarían diferencias en las imágenes obtenidas en esas dos situaciones. Y, para observar esas diferencias con claridad, deberían sustraer, de las imágenes tomadas al vocalizar, los píxeles de las imágenes tomadas durante la lectura pasiva; se supondría que la actividad de las neuronas situadas en las regiones que permanecen "iluminadas" es la que hace falta para leer en voz alta.

En esa labor se descartaría toda actividad intrínseca, es decir, la actividad de fondo permanente. Al representar así los datos, resulta sencillo visualizar las regiones del cerebro que permanecen "excitadas" durante un comportamiento determinado, como si hubiesen estado inactivas hasta el momento de necesitarse para una tarea concreta.

Andando el tiempo, nuestro grupo, y no sólo el nuestro, sintió curiosidad por determinar qué ocurría cuando alguien se encontraba tumbado y con la mente vagando. Un interés que surgió a partir de una serie de indicios que aparecieron en varios estudios y que denotaban la intensidad de una actividad desarrollada entre bambalinas.

Una de las claves nos llegó de la simple inspección visual de las imágenes. Las fotografías

CEREBROS EN REPOSO

Al principio, la tomografía de emisión de positrones o la resonancia magnética funcional, técnicas inocuas, no captaban signos de actividad basal en el cerebro cuando el individuo se encontraba en reposo. Aportaban, pues, una imagen incorrecta de la actividad nerviosa.



Inactivo, como cuando se sueña despierto



Actividad concentrada en una tarea, como cuando se está leyendo

ANTIGUO PUNTO DE VISTA ►

Originariamente, las imágenes cerebrales parecían sugerir que la mayoría de las neuronas permanecían en reposo hasta que se las reclamaba para llevar a cabo alguna actividad, por ejemplo leer, momento en el que el cerebro se excitaba y consumía energía para emitir las señales necesarias para la tarea.



Inactividad cerebral



Actividad cerebral elevada

NUEVO PUNTO DE VISTA ►

En los últimos años, nuevos estudios de neuroimagen han demostrado que el cerebro mantiene un elevado nivel de actividad incluso cuando se encuentra "en reposo". De hecho, la lectura u otras tareas rutinarias requieren una mínima energía adicional, incrementándose en menos de un 5 por ciento sobre la que ya se consumía en el estado basal, intensamente activo.





Actividad cerebral elevada



Actividad cerebral más elevada

SIMON JARRATT *Corbis (fotografías)*; JEAN-FRANCOIS PODEVIN *(ruedas dentadas y bombillas)*

mostraban que había áreas, en muchas regiones del cerebro, bastante ocupadas; en ambas situaciones, la de prueba y la de referencia. Debido, en parte, a este "ruido" de fondo compartido, resulta difícil, si no imposible, establecer diferencias entre una tarea y la situación basal a partir de la mera observación de las imágenes; sólo se puede conseguir tras recurrir a refinados análisis computerizados de imágenes.

La investigación ulterior reveló que el desarrollo de una tarea concreta implica un incremento del consumo energético del cerebro que supone menos del 5 por ciento de la actividad basal subyacente. Una parte importante de la actividad global (entre el 60 y el 80 por ciento de toda la energía que utiliza el cerebro) se despliega en circuitos sin relación alguna con acontecimientos externos. En concesión a nuestros colegas astrónomos, decidimos llamar a esta actividad intrínseca la energía oscura del cerebro, una expresión que remite a la energía invisible, que representa la masa de la mayor parte del universo.

La cuestión de la existencia de la energía oscura neural se planteó también tras observar la escasa información procedente de los sentidos que llega a las regiones de procesamiento internas del cerebro. Por botón de muestra, la información visual se va degradando de forma significativa en su camino desde el ojo hacia la corteza visual.

De la cantidad, ilimitada, de información disponible en el mundo que nos rodea, el equivalente a 10.000 millones de bits por segundo llega hasta la retina, situada en la parte posterior del ojo. Puesto que el nervio óptico conectado a la retina posee sólo un millón de eferencias, hay seis millones de bits por segundo que pueden salir de la retina y únicamente 10.000 bits por segundo consiguen llegar hasta la corteza visual.

Tras ser sometida a procesamientos ulteriores, la información visual alcanza las regiones del cerebro responsables de la formación de nuestra percepción consciente. Para sorpresa de muchos, la cantidad de información que constituye la percepción consciente no alcanza los 100 bits por segundo. Esa afluencia magra de datos no podría, a buen seguro, originar una percepción, en el caso de que fuera lo único que el cerebro tomase en cuenta. Debe intervenir la actividad intrínseca.

Otro indicio de la capacidad de procesamiento intrínseca del cerebro nos lo ofrece el recuento del número de sinapsis, los puntos de contacto entre neuronas. En la corteza visual, el número de sinapsis dedicadas a la información visual aferente no constituye siquiera el 10 por ciento de las existentes. Por tanto, la gran mayoría debe representar conexiones internas entre las neuronas de esa región del cerebro.



JEAN-FRANCOIS PODEVIN

UNA PISTA QUE LLEVA A UNA NUEVA IDEA

Desde hace bastante tiempo, los investigadores sabían que sólo una pequeña parte de la información, de entre el diluvio infinito que suministra el entorno, alcanzaba los centros de procesamiento del cerebro. Así, aunque se transmiten seis millones de bits a través del nervio óptico, sólo 10.000 bits consiguen llegar hasta la región de procesamiento visual del cerebro y sólo unos cientos están implicados en la elaboración de una percepción consciente (insuficientes para generar, por sí mismos, una percepción significativa). El hallazgo sugirió que el cerebro realizaría, a buen seguro, constantes predicciones sobre el entorno, anticipándose a la magra información sensorial que le llega de cuanta proporciona el mundo exterior.

El autor

Marcus E. Raichle es catedrático de radiología y neurología en la facultad de medicina de la Universidad de Washington en St. Louis. Durante muchos años, Raichle ha dirigido un equipo que investiga el funcionamiento del cerebro humano, basado en la aplicación de la tomografía de emisión de positrones y la resonancia magnética funcional. Fue elegido miembro del Instituto de Medicina en 1992 y miembro de la Academia Nacional de Ciencias en 1996.

Descubrir el modo operativo por defecto

Los indicios reseñados de una vida interna del cerebro se conocían. Pero faltaba desentrañar la fisiología de la actividad intrínseca del cerebro, con su posible repercusión sobre la percepción y el comportamiento. Por fortuna, una observación accidental e intrigante que tuvo lugar durante ciertos estudios de TEP, y posteriormente corroborada mediante RMf, nos situó en la senda que nos llevaría a descubrir la RND.

A mediados de los noventa, reparamos de forma accidental en un fenómeno sorprendente: cuando los sujetos desplegaban alguna tarea, ciertas regiones del cerebro experimentaban una *disminución* de su nivel de actividad en comparación con el estado basal de reposo. Tales áreas —concretamente, una parte de la corteza parietal medial (región próxima al centro del cerebro que interviene en el recuerdo de los acontecimientos personales, entre otros)—, experimentaban esa caída cuando otras áreas se veían implicadas en la ejecución de una tarea determinada, como leer en voz alta. En nuestro desconcierto, denominamos "área parietal medial misteriosa" (APMM) a la zona que demostraba la mayor depresión.

Una serie de experimentos con aplicación de TEP confirmaron que el cerebro no se hallaba, ni mucho menos, al ralentí cuando no intervenía en actividades conscientes. De hecho, la APMM, igual que la mayoría de las demás regiones, permanecía activa hasta que el cerebro se centraba en alguna tarea novedosa, momento en el que decrecía la actividad intrínseca de algunas áreas.

Al principio, nuestros resultados fueron recibidos con cierto escepticismo. En 1998 llegaron incluso a rechazarnos un manuscrito sobre estos hallazgos porque uno de los revisores externos sugirió que la disminución de la actividad que describíamos constituía un error de la recogida de datos. En realidad, afirmaba el revisor, los circuitos se activaban durante el reposo y se desconectaban mientras se realizaba la tarea.

Sin embargo, otros investigadores reprodujeron nuestros resultados, lo mismo en el caso de la corteza parietal medial que en el de la corteza prefrontal medial (que interviene cuando nos imaginamos los pensamientos de los demás, así como en aspectos de nuestro estado emocional). En la actualidad, ambas regiones se consideran las centralitas principales de la RND.

El descubrimiento de la RND nos proporcionó una nueva visión sobre la actividad intrínseca del cerebro. Hasta que aparecieron las publicaciones, los neurofisiólogos ni siquiera se imaginaron esas regiones constituidas en un sistema, al modo del sistema óptico o el sistema motor (un conjunto de regiones discretas que se comunican entre sí para realizar una tarea).

La idea de que el cerebro pudiera presentar semejante tipo de actividad interna entre múltiples regiones durante el reposo no llegó a ser aceptada entre los expertos en técnicas de formación de imágenes. ¿Era sólo la RND la que mostraba esta característica o se daba de forma más general por todo el cerebro? Un hallazgo sorprendente sobre el modo en que entendemos y analizamos la RMf nos proporcionó la clave que necesitábamos para contestar a las preguntas.

Se habla, por lo común, de la señal de RMf como la señal dependiente del nivel de oxígeno en sangre, o señal DNOS, porque el método de obtención de imágenes se basa en cambios en las concentraciones de oxígeno en el cerebro humano inducidos por alteraciones en el flujo sanguíneo. La señal DNOS procedente de cualquier región del cerebro, cuando se observa en estado de reposo tranquilo, fluctúa ligeramente en ciclos cuya duración ronda los 10 segundos. Esas fluctuaciones tan pausadas se atribuían al ruido de fondo; por tanto, los datos detectados por el escáner se eliminaban para distinguir mejor la actividad cerebral correspondiente a la tarea concreta para la que se obtenían las imágenes.

En 1995 se empezó a cuestionar si era acertado descartar las señales de baja frecuencia, cuando Bharat Biswal y su equipo, de la Universidad Médica de Wisconsin, observaron que, incluso cuando un sujeto permanecía sin moverse, el "ruido" en el área del cerebro que controla el movimiento de la mano derecha fluctuaba al unísono con una actividad similar en el área del lado opuesto del cerebro relacionada con el movimiento de la mano izquierda. Iniciado el nuevo milenio, el grupo encabezado por Michael Greicius, de la Universidad de Stanford, descubrieron el mismo tipo de fluctuaciones sincronizadas en la RND de un sujeto en reposo.

Ante el interés creciente suscitado por el papel de la RND en la función del cerebro, el descubrimiento del equipo de Greicius desencadenó un frenesí de actividad en laboratorios de todo el mundo, incluido el nuestro. Se cartografió *todo* el ruido, la actividad intrínseca de los principales sistemas del cerebro. Estos extraordinarios patrones de actividad aparecían incluso bajo los efectos de la anestesia general y durante el sueño ligero, lo que sugería que se trataba de una característica fundamental del funcionamiento del cerebro y no mero ruido de fondo.

Con este trabajo se hizo evidente que la RND es responsable de sólo una parte, aunque determinante, de la actividad intrínseca global. La idea de la existencia de un modo operativo por defecto se extendió a todos los sistemas cerebrales. En nuestro laboratorio, el descubrimiento de un modo operativo por defecto generalizado se produjo tras indagar en los estudios sobre potenciales corticales lentos (PCL); en esta actividad cerebral participaban grupos de neuronas que emitían impulsos cada 10 segundos, aproximadamente. Nuestras investigaciones determinaron que las fluctuaciones espontáneas observadas en las imágenes de las señales DNOS eran idénticas a los PCL: la misma actividad registrada con métodos de detección distintos.

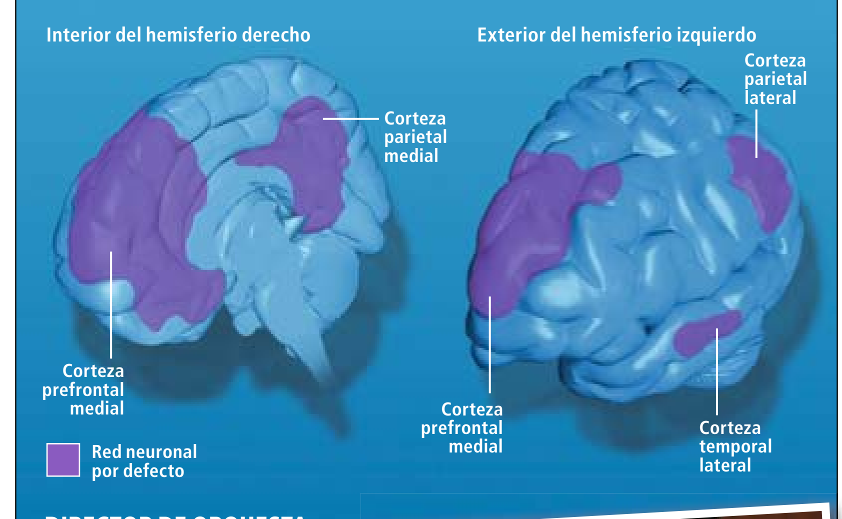
Nos pusimos a examinar la finalidad de los PCL, habida cuenta de su relación con otras se-

LA RED NEURONAL POR DEFECTO

Un conjunto de regiones del cerebro que colaboran entre sí y al que se denomina red neuronal por defecto (RND) parece ser responsable de gran parte de la actividad desarrollada mientras la mente divaga perdida; ese entramado podría desempeñar un papel fundamental en el funcionamiento mental.

CENTRO DE CONTROL ▼

La RND consta de varias regiones del cerebro alejadas entre sí, entre las que se incluyen las que se señalan en la figura inferior.



DIRECTOR DE ORQUESTA DEL PROPIO YO ►

Se cree que la RND se comporta de forma parecida a un director de orquesta, emitiendo señales de sincronización, a imagen del director de orquesta que agita su batuta, para coordinar la actividad entre las diferentes regiones del cerebro. Probablemente, tal sincronización (entre las regiones visual y auditiva del córtex, por ejemplo) asegura que todas las regiones del cerebro se hallen listas para reaccionar de forma concertada ante los estímulos.



EDDY RISCH *epa/Corbis (director de orquesta)*; JEAN-FRANCOIS PODEVIN *(cerebros)*

ñales eléctricas nerviosas. Tal y como demostró Berger y se confirmara luego en innumerables ocasiones por otros investigadores, la señalización del cerebro está formada por un amplio espectro de frecuencias, que incluye desde los PCL de baja frecuencia hasta actividades con frecuencias superiores a los 100 ciclos por segundo. Uno de los grandes retos de la neurociencia consiste en comprender la interacción entre señales de distinta frecuencia.

Los PCL tienen un papel muy influyente. Nuestro propio trabajo y el de otros demuestran que la actividad eléctrica a frecuencias superiores a las de los PCL se sincroniza con las oscilaciones, o fases, de los PCL. Tal y como han observado recientemente Matias Palva y su grupo, de la Universidad de Helsinki, la fase ascendente de un PCL da lugar a un incremento de la actividad de las señales que tienen frecuencias distintas.

La orquesta sinfónica nos proporciona una metáfora adecuada, con su amalgama integrada de sonidos procedentes de multitud de instrumentos que suenan al mismo ritmo. Los PCL vienen a representar la batuta del director. En lugar de llevar el compás de un conjunto de instrumentos musicales, las señales de marras coordinan el acceso que requiere cada uno de los sistemas cerebrales al inmenso repositorio de recuerdos y de otros tipos de información necesarios para la supervivencia en un mundo complejo y en cambio continuo. Los PCL aseguran que las operaciones adecuadas se realicen de manera coordinada y en el momento preciso.

Pero la complejidad del cerebro supera la de una orquesta sinfónica. Cada sistema especializado del cerebro (como el que controla la actividad visual o el que acciona los músculos) manifiesta su propia pauta de PCL. Se evita el caos, porque no todos los sistemas se han creado del mismo modo. Las señales eléctricas procedentes de algunas regiones del cerebro tienen preferencia sobre otras. En el punto más alto de esa jerarquía se encuentra la RND, que actúa como un superconductor para asegurar que, a la hora de competir entre sí, la cacofonía de señales procedentes de un sistema no interfiera con las de otro. Una estructura organizativa que no resulta sorprendente, porque el cerebro no consiste en una serie de sistemas independientes que funcionan a su antojo, sino en una federación de componentes interdependientes.

Al mismo tiempo, esa actividad interna tan compleja debe, en algunas ocasiones, ceder a las demandas del mundo externo. Para cumplir con tales obligaciones, los PCL de la RND disminuyen cuando hay que prestar atención, porque recibimos una señal sensorial novedosa o inesperada: de repente te das cuenta de que habías prometido comprar un cartón de leche en el camino de vuelta a casa tras salir del trabajo. Los mensajes internos de los PCL se reanudan, cuando se amortigua la necesidad de centrar la atención. El cerebro está lidiando sin cesar con la necesidad de mantener un equilibrio entre las respuestas planificadas y las necesidades inmediatas del momento.

DISFUNCION Y ENFERMEDAD

La red neuronal por defecto se solapa con regiones implicadas en importantes trastornos cerebrales; podrían éstos venir causados por daños producidos en la red. Distinguir de manera precisa qué aspectos de la red resultan afectados por la enfermedad de Alzheimer, la depresión u otros trastornos podría contribuir al desarrollo de nuevos diagnósticos y tratamientos.

ENFERMEDAD DE ALZHEIMER

Las regiones del cerebro que se atrofian en la enfermedad de Alzheimer coinciden de manera sustancial con los principales centros de la RND.

DEPRESION

Los pacientes presentan una disminución del número de conexiones entre una región de la RND y regiones implicadas en las emociones.

ESQUIZOFRENIA

Muchas regiones de la RND presentan niveles de señalización más elevados. La importancia del hallazgo es algo que todavía se está investigando.



KENT LARSSON *Getty Images*

Consciencia y enfermedad

Los altibajos de la RND nos pueden aportar algunas luces sobre los misterios más profundos del cerebro. Ya ha proporcionado fascinantes detalles sobre la naturaleza de la atención, un componente fundamental de la actividad consciente. En 2008, un equipo internacional de investigadores publicó que, al observar la RND, se podía pronosticar, hasta con 30 segundos de antelación, el momento en el que un sujeto examinado con escáner iba a cometer un error en un juego de ordenador. Se produciría un error si, en ese momento, el modo operativo por defecto asumía el mando y decaía la actividad de las regiones implicadas en la concentración en una tarea.

Y en los próximos años, la energía oscura del cerebro nos podrá proporcionar pistas sobre la naturaleza de la consciencia. Tal y como reconocen la mayoría de los neurólogos, nuestras interacciones conscientes con el mundo son sólo una pequeña parte de la actividad del cerebro. Lo que tiene lugar por debajo del nivel de la consciencia (la energía oscura del cerebro, por poner un ejemplo) resulta fundamental a la hora de proporcionar el contexto que rodea a todo lo que experimentamos en la pequeña ventana de la vigilia consciente.

Además de ofrecer una panorámica de los acontecimientos que tienen lugar entre bambalinas y que subyacen tras nuestra experiencia cotidiana, el estudio de la energía oscura del cerebro puede aportar nuevas pistas que nos ayuden a comprender mejor algunas enfermedades neurológicas. Para realizar un experimento no serán necesarios ni la gimnasia mental ni los movimientos complicados. Un sujeto sólo tiene que permanecer quieto en el interior del escáner mientras la RND y otras centralitas de la energía oscura realizan su cometido en silencio.

Este tipo de investigaciones ya han arrojado cierta luz sobre determinadas patologías. Los estudios basados en técnicas de formación de imágenes han descubierto alteraciones en las conexiones entre células cerebrales de las regiones de la RND de pacientes con alzheimer, depresión, autismo o incluso esquizofrenia. De hecho, es posible que algún día el alzheimer se tipifique entre las enfermedades de la RND. Una proyección de las regiones cerebrales afectadas por el alzheimer coincide nítidamente con el mapa de las áreas que constituyen la RND. Estos patrones no sólo pueden servir como marcadores biológicos para el diagnóstico, sino que pueden también proporcionar un conocimiento más profundo sobre las causas de la enfermedad y sobre las estrategias a seguir para su tratamiento.

Con la vista puesta en el futuro, los investigadores deben ahora establecer cómo funcionan coordinadas, las neuronas, lo mismo en el seno de los sistemas cerebrales que entre sistemas, y cómo puede la RND generar señales químicas y eléctricas para que se transmitan a través de los circuitos cerebrales.

Superada esa meta, harán falta nuevas teorías para integrar los datos obtenidos en células, en circuitos y en la totalidad de los sistemas neurales para generar una panorámica más amplia sobre el modo operativo por defecto del cerebro y su poder de organizador supremo de su energía oscura. Con el tiempo, la energía oscura neural podrá llegar a considerarse la propia esencia de lo que nos hace ir perviviendo.

Bibliografía complementaria

SPONTANEOUS FLUCTUATIONS IN BRAIN ACTIVITY OBSERVED WITH FUNCTIONAL MAGNETIC RESONANCE IMAGING. Michael D. Fox y Marcus E. Raichle en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 8, págs. 700-711; septiembre de 2007.

DISEASE AND THE BRAIN'S DARK ENERGY. Dongyang Zhang y Marcus E. Raichle en *Nature Reviews Neurology*, vol. 6, págs. 15-18; enero de 2010.

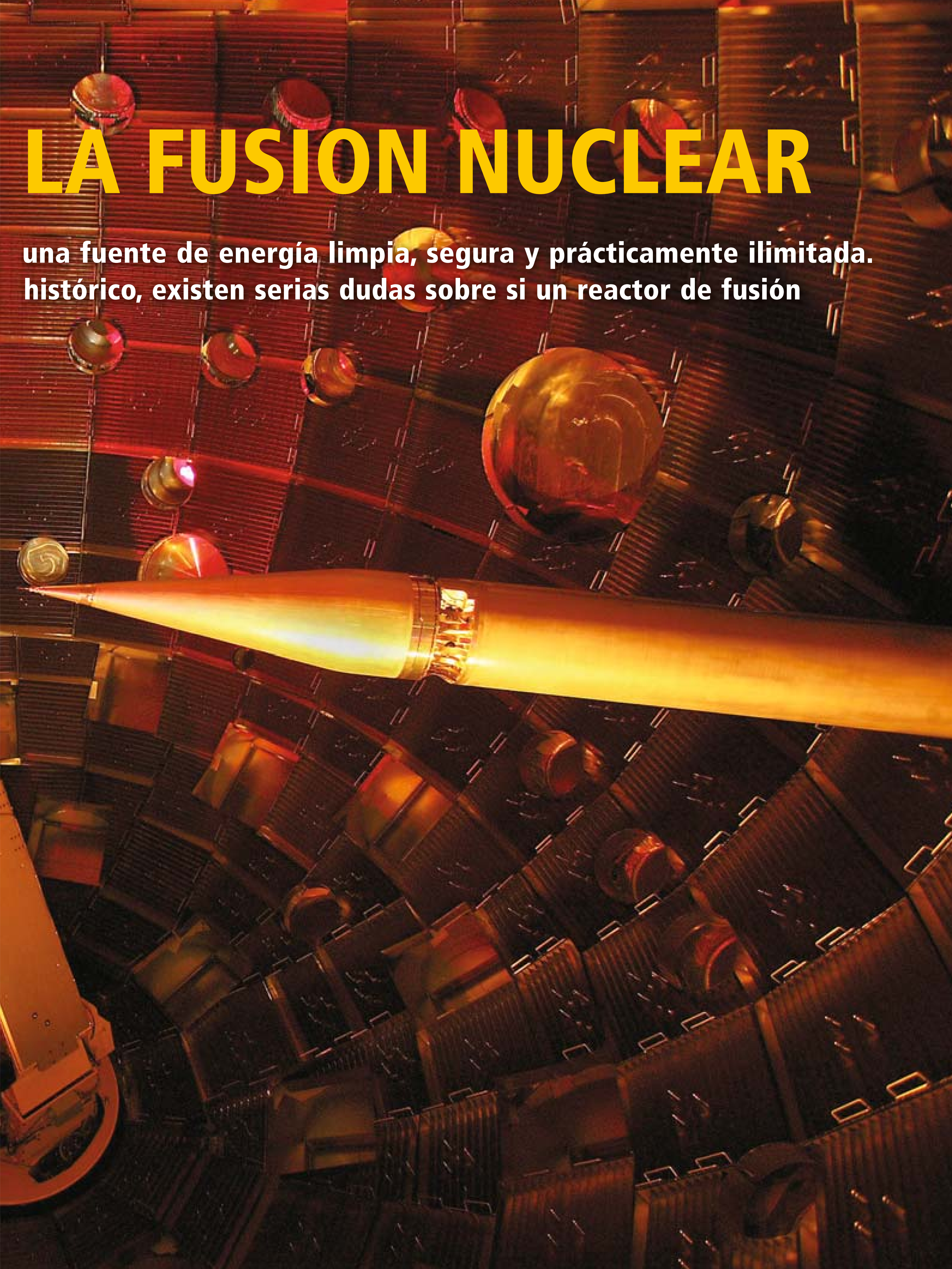
TWO VIEWS OF BRAIN FUNCTION. Marcus E. Raichle en *Trends in Cognitive Science*, vol. 14, n.º 4, págs. 180-190; 4 de marzo de 2010.



LAS DIFICULTADES DE

Hace tiempo que la ciencia sueña con dominar la fusión nuclear, Si bien la investigación en este campo alcanzará en breve un hito llegará a funcionar alguna vez ● **MICHAEL MOYER**

1. LA CAMARA DE IGNICION. En el interior del Centro Nacional de Ignición, en EE.UU., 192 láseres convergerán en una diana de combustible de deuterio y tritio. La implosión resultante deberá emitir más energía que la aportada por los láseres, un primer paso imprescindible para cualquier futuro reactor de fusión.



LA FUSION NUCLEAR

una fuente de energía limpia, segura y prácticamente ilimitada.
histórico, existen serias dudas sobre si un reactor de fusión

CONCEPTOS BASICOS

- Se espera que la fusión de isótopos de hidrógeno llegue pronto a emitir más energía que la requerida para provocar esa reacción. Se daría un paso crucial en la ya larga búsqueda de una fuente de energía basada en la fusión nuclear.
- Si este excedente de energía pudiera controlarse, supondría la base de una fuente de energía revolucionaria.
- Sin embargo, los enormes obstáculos en la ingeniería requerida por una planta de fusión viable podrían impedir su construcción en los años venideros.

El Centro Nacional de Ignición de EE.UU. (NIF, por sus siglas en inglés) es el sistema de fusión inducida por láser mayor y más potente del mundo; un proyecto de 13 años que ha costado 3000 millones de euros. La ignición está ya muy próxima en el NIF. Dentro de uno o dos años, los 192 láseres de la instalación se concentrarán en una cápsula del tamaño de un grano de pimienta. La energía de bombeo será tal que hará que los isótopos de hidrógeno contenidos en la cápsula se fusionen y liberen energía; igual que en una bomba termonuclear en miniatura.

Si bien esto ya se ha conseguido en el pasado, en todos los casos precedentes de fusión controlada hizo falta que los láseres aportasen una energía mucho mayor que la obtenida en la reacción. En el NIF, sin embargo, cambiarán las tornas. La implosión en el centro de la cápsula liberará más energía que la que entreguen los láseres. En teoría, la energía neta resultante podría acumularse y emplearse para hacer funcionar una central eléctrica. Los combustibles empleados procederían de sustancias presentes en el agua de mar ordinaria, las emisiones atmosféricas serían nulas y tampoco se generarían residuos nucleares.

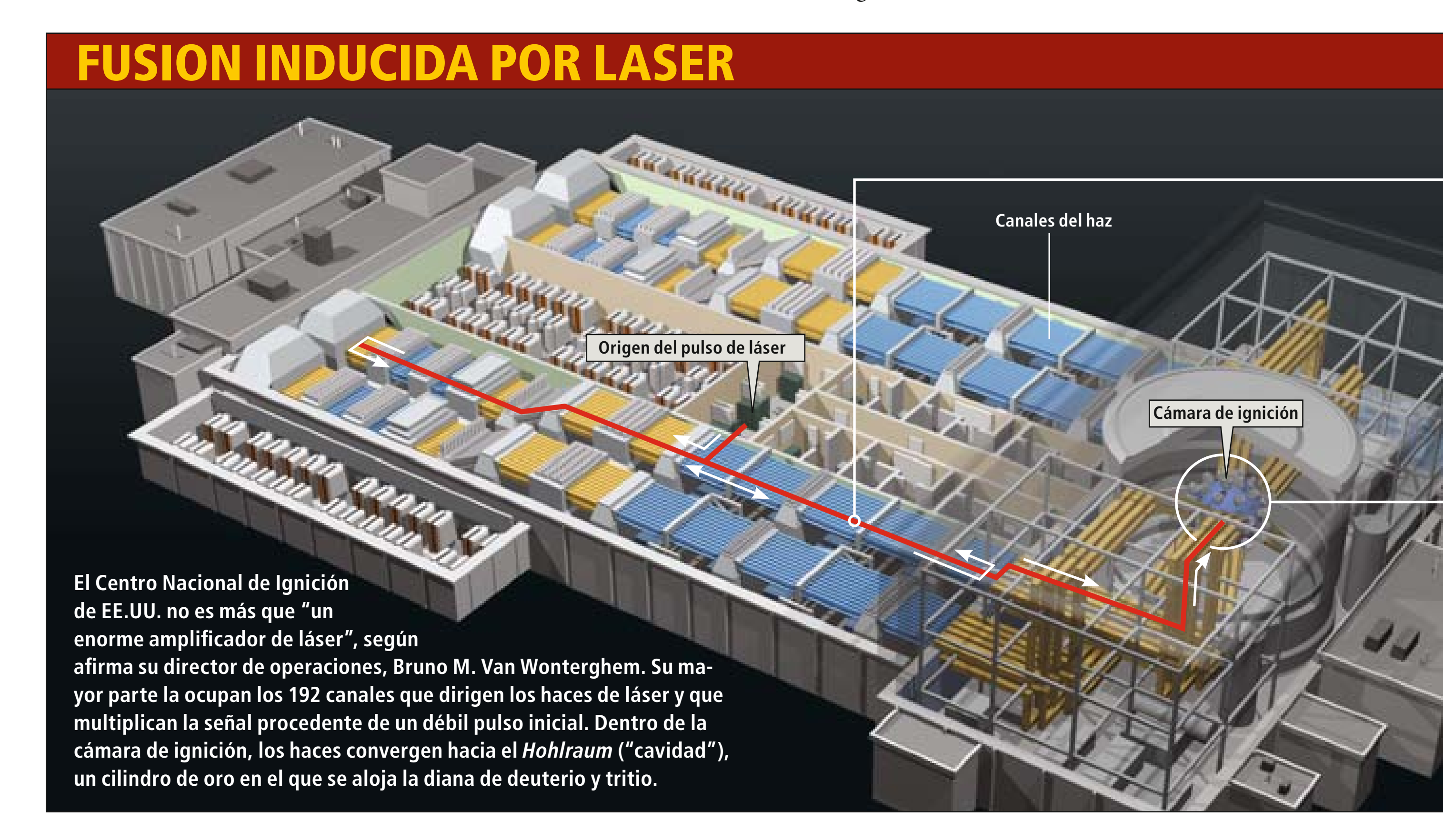
Por su parte, la que se convertirá en la otra gran instalación mundial de fusión, el Reactor Termonuclear Experimental Internacional (ITER, por sus siglas en inglés), ha comenzado a construirse cerca de la aldea de Cadarache, en el sur de Francia. En el ITER la fusión no se basará en la inducción por láser; unos imanes superconductores mantendrán confinados a los isótopos de hidrógeno y los calentarán hasta unos 150 millones de grados Celsius (25.000 veces la temperatura de la superficie solar). Se espera que el ITER consiga también una ganancia neta de energía. Además, a diferencia de las ráfagas de energía intermitentes que ofrece la fusión por láser, los imanes podrán mantener confinado al plasma durante decenas o quizá cientos de segundos, generando energía en ese intervalo temporal.

Los logros citados marcarán un hito en la afanosa búsqueda que, desde los inicios de la era nuclear, intenta dominar los procesos de fusión; los mismos que tienen lugar en el interior de las estrellas y las hacen brillar. Pero es posible que conseguir la ignición no suponga sino uno de los pasos más sencillos. Cada vez más, expertos veteranos reconocen que la construcción y explotación de una planta de fusión nuclear puede presentar retos mucho más serios que el de generar la ignición inicial. Y algunos físicos llegan a plantearse si, incluso desde un punto de vista teórico, tal hazaña es posible.

Son múltiples las dificultades que van más allá de la obtención neta de energía. Los materiales del reactor tendrían que soportar, durante largos años, temperaturas de millones de grados, amén de los continuos bombardeos de

CORTESIA DEL LABORATORIO NACIONAL LAWRENCE EN LIVERMORE *(doble página anterior)*

FUSION INDUCIDA POR LASER



El Centro Nacional de Ignición de EE.UU. no es más que "un enorme amplificador de láser", según afirma su director de operaciones, Bruno M. Van Wonterghem. Su mayor parte la ocupan los 192 canales que dirigen los haces de láser y que multiplican la señal procedente de un débil pulso inicial. Dentro de la cámara de ignición, los haces convergen hacia el *Hohlraum* ("cavidad"), un cilindro de oro en el que se aloja la diana de deuterio y tritio.

partículas nucleares de alta energía. Bajo tales condiciones, los materiales se tornan quebradizos y radiactivos. Además, como veremos más adelante, el reactor debería producir, en un complejo proceso, parte de su propio combustible nuclear. Y, para poder formar parte de la red de suministro eléctrico, su funcionamiento habría de mantenerse estable (sin interrupciones, caídas ni averías) durante decenios.

Como afirma Richard D. Hazeltine, director del Instituto de Estudios de Fusión de la Universidad de Texas en Austin: "Hasta ahora, la directriz ha sido: 'Bien, puede que todos ellos constituyan problemas difíciles, pero son solubles. De momento, concentrémonos en la fusión en sí'. Tal vez pensar así haya sido un error".

Una promesa de la naturaleza

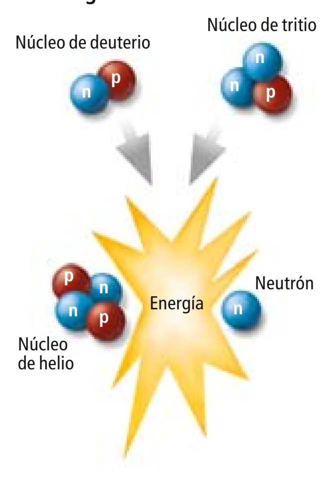
Podría decirse que la fusión nuclear (o, mejor, su ausencia) viene confundiendo a los científicos desde 1859, año en que Charles Darwin publicó *El origen de las especies*. Según su teoría, se habrían necesitado miles de millones de años de selección natural para explicar la increíble diversidad de la vida en la Tierra. Sin embargo, el eminente físico británico William Thompson (más recordado como Lord Kelvin) había dictaminado que la edad del Sol no podía exceder unas decenas de millones de años. Como narra Charles Seife en su excelente obra *Sun in a Bottle* ("El Sol en una botella", 2008), Darwin interpretó la crítica de Thompson como uno de los más graves ataques a su teoría de la evolución. Se limitó a replicar que los científicos deberían abstenerse de formular juicios hasta que no se comprendan mejor las leyes del cosmos.

Darwin tenía razón. Habrían de transcurrir siete decenios antes de que los científicos lograsen entender cómo y por qué brilla el Sol. Hacia 1930 ya se sabía que toda la materia estaba formada por átomos; que éstos tienen un núcleo compuesto de protones, de carga positiva, y neutrones, sin carga. Con su famosa ecuación, $E = mc^2$, Albert Einstein había demostrado que la masa podía transformarse en energía. Y los estudios espectrográficos indicaban que el Sol no se componía de rocas fundidas, como suponía Thompson, sino en su mayor parte de hidrógeno, junto con algo de helio.

En 1938, Hans Bethe estimó que, en el centro del Sol, la presión habría de ser tan grande, que, a pesar de la repulsión que ordinariamente experimentan las cargas del mismo signo, los núcleos de hidrógeno tendrían que fusionarse entre sí. Bethe representó en una cadena de cuatro etapas el proceso de fusión de iones de hidrógeno. Los productos finales de la reacción eran algo más ligeros que los iniciales, por lo que la masa desaparecida se convertiría,

LA REACCION D-T

Cuando un núcleo de deuterio y otro de tritio son forzados a aproximarse lo suficiente (a temperaturas y presiones muy elevadas), vencen su mutua repulsión electromagnética y se fusionan. Esa reacción genera un núcleo de helio, un neutrón y un excedente de energía.



Placa de vidrio amplificadora

Lámpara de destellos

1 AMPLIFICADOR LASER
Una vez que el débil pulso de láser inicial es dividido y transmitido por los preamplificadores, atraviesa una serie de placas de vidrio amplificadoras. Unas lámparas de destellos de xenón excitan el neodimio contenido en el vidrio. Al ser atravesado por el láser, el vidrio transmite al haz la energía de excitación. El proceso se repite más de 52 veces; en cada una de ellas, la energía del haz se incrementa en un 25 por ciento.

Haz ultravioleta

Hohlraum (cavidad)

Cápsula (diana)

Rayos X

2 HACIA EL BLANCO
Al penetrar en la cámara de ignición, de unos 10 metros de anchura, unos cristales dividen por dos la longitud de onda de la luz láser, pasando ésta del rojo (más adecuado para la óptica de haces lineales) al ultravioleta, más eficaz para inducir la fusión.

Cámara de ignición

3 IGNICION
En el centro de la cámara de ignición, los haces convergen hacia las dos caras del *Hohlraum*, una cavidad de oro que responde emitiendo rayos X de alta energía. Estos queman la capa externa de la cápsula y comprimen su interior hasta alcanzar una densidad 100 veces mayor que la del plomo y una temperatura de 100 millones de grados. El súbito aumento de presión y temperatura desencadena la fusión.

DON FOLEY (*instalación*); JESSICA HUPPI (*reacción d-t*)

de acuerdo con la ecuación $E = mc^2$, en la energía que alimentaba al Sol.

Esa compleja reacción en cadena requiere presiones que sólo existen en el centro de las estrellas. Sin embargo, un mecanismo algo más viable para inducir la fusión consiste en comenzar con dos isótopos del hidrógeno: el deuterio (cuyo núcleo consta de un protón y un neutrón) y el tritio (un protón y dos neutrones). Si se consigue acercar lo suficiente estos dos núcleos, ambos se fusionan para dar un núcleo de helio (dos protones y dos neutrones), un neutrón y energía adicional. La temperatura y presión requeridas son relativamente modestas, pero la energía generada es enorme.

Si la fusión se pudiera catalizar en un entorno controlado, se acabarían los problemas energéticos del mundo. Los combustibles abundan: el agua de mar contiene deuterio, y el tritio puede generarse en un reactor. A diferencia de los reactores ordinarios de fisión, la fusión no produce subproductos radiactivos de larga vida. En teoría, unos cuatro litros de agua con deuterio pueden generar la energía almacenada en un superpetrolero lleno, limitándose a emitir como resultado una bocanada de helio. Tal y como afirma Edward I. Moses, director del NIF: "No habría problemas geopolíticos, la energía sería limpia y el suministro, inagotable. Demasiado bueno para ser cierto".

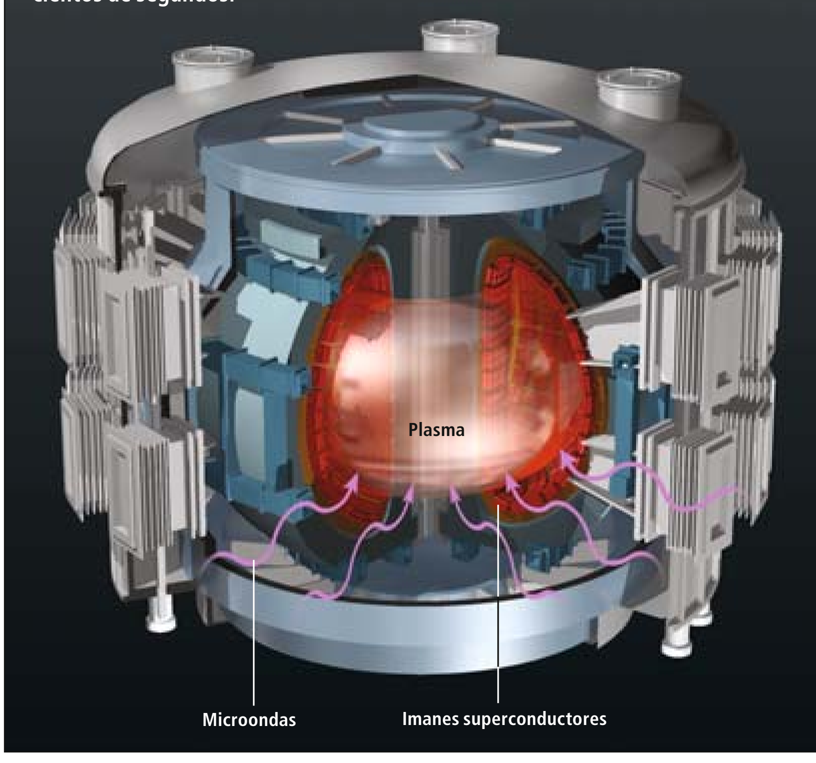
Los primeros diseños de reactores de fusión aparecieron en el decenio de los cincuenta, cuando Lyman Spitzer, profesor de la Universidad de Princeton, calculó que su *Stellarator* (del latín *stella*) generaría una potencia de 150 megawatt, suficiente para abastecer a 150.000 viviendas. Su diseño se basaba en que, a las altas temperaturas requeridas para la fusión, todos los electrones se habrían desprendido de sus respectivos átomos. Esto da lugar a una "sopa" de partículas cargadas (denominada *plasma*), la cual puede controlarse con un campo magnético.

En líneas generales, el *Stellarator* de Spitzer era una botella magnética que mantendría confinado el plasma aun a temperaturas de millones de grados. Sin embargo, Spitzer y sus seguidores no disponían de un conocimiento detallado sobre la dinámica de plasmas. No tardarían en descubrir lo complejo del comportamiento de ese estado singular de la materia.

Imaginemos un globo grande y fangoso al que intentamos comprimir lo máximo posible. Por muy uniforme que sea la presión aplicada, el globo siempre acabará escurriéndose por algún hueco entre los dedos. Algo muy parecido sucede con los plasmas. Siempre que se ha intentado confinarlos en una región lo suficientemente pequeña como para desencadenar la fusión, los iones encuentran alguna vía de escape. Este fenómeno es común a todos los tipos de reactores de fusión: cuanto más se calienta y comprime el plasma, más se resiste éste a los esfuerzos para confinarlo.

CONFINAMIENTO MAGNETICO

En Francia, el proyecto ITER intentará inducir la fusión calentando un plasma de deuterio y tritio. Unos potentes imanes superconductores confinarán el plasma, al tiempo que se emplearán haces de microondas para calentarlo hasta 150 millones de grados. El proceso no será intermitente, como el realizado por los láseres del NIF, sino que la fusión podrá prolongarse durante decenas o incluso cientos de segundos.



La energía del pulso de láser que comprimirá la cápsula sobrepasará al consumo eléctrico de EE.UU. en ese momento.

En los sesenta años transcurridos, los científicos han intentado dominar los plasmas, empleando para ello botellas magnéticas cada vez mayores. Sin embargo, cada vez que se ha conseguido diseñar un dispositivo que solucionase los problemas que presentaba el anterior, han aparecido inconvenientes nuevos e inesperados.

La crisis energética del decenio de los setenta supuso el nacimiento de un programa paralelo con el objetivo de evitar las dificultades inherentes al confinamiento magnético de plasmas. Dichas técnicas se basaban en el empleo de láseres para comprimir y calentar una pequeña cápsula de deuterio y tritio. La investigación, llevada a cabo en el Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore (sede de los programas militares de fusión en EE.UU.), comenzó con un montaje sencillo consistente

DON FOLEY

en dos haces láser. Los sucesivos incrementos en la potencia de los láseres dieron lugar, en 1977, a la instalación láser *Shiva* (en honor al dios hindú de la creación y la destrucción) y, posteriormente, a *Nova* (1984).

Cada uno de esos programas batió las propias marcas mundiales que ya ostentaba el Laboratorio Nacional de Livermore en lo referente al láser más potente del planeta. Sin embargo, al igual que en los programas basados en el confinamiento magnético, ninguno de ellos logró alcanzar el umbral de producción energética; es decir, el punto en el que la energía liberada en la fusión iguala a la suministrada por los láseres. Para ello, el Lawrence de Livermore hubiera necesitado un láser 70 veces más potente que ningún otro anterior. Años más tarde, en 1997, comenzaría la construcción del Centro Nacional de Ignición.

Explosiones en miniatura

Visto desde fuera, el NIF no parece gran cosa. Sin ventanas, su tamaño recuerda el de un hangar de aviación. Pero, al igual que la mayoría de los proyectos científicos ambiciosos, sobrecoge su interior. Docenas de tubos de un metro de anchura se extienden a lo largo de la instalación, tubos que acaban en la cámara de ignición; la estancia es una esfera de tres pisos de altura tachonada de portillas que permiten el paso de los haces de láser.

En el centro de la cámara, un mecanismo que se asemeja a la punta de un lápiz gigante mantiene en posición fija el blanco de deuterio y tritio. Los láseres se concentrarán a unos pocos milímetros alrededor del punto central, aplastando la cápsula con un pulso de láser cuya energía eclipsaría, al menos durante una fracción de segundo, al consumo eléctrico de todo el país.

Aunque el NIF está diseñado para alcanzar el umbral de producción energética, su función primordial atañe a la seguridad nacional. En 1996, el presidente Bill Clinton firmó el Tratado de Prohibición Completa de Ensayos Nucleares, ilegalizando con ello todas las pruebas de este tipo. Para garantizar que las armas almacenadas hasta la fecha continúen operativas según lo previsto (es decir, que una posible detonación de ojivas tenga lugar si y sólo si el presidente lo ordena), los laboratorios nacionales de armamento nuclear de Los Alamos y Livermore iniciaron un programa de custodia de las reservas nucleares; esto es, un sistema de mantenimiento y pruebas concebido para garantizar la fiabilidad de las 5200 cabezas nucleares actualmente en depósito.

El mantenimiento de semejante arsenal suele limitarse a inspecciones rutinarias y a la reposición de piezas. Otra tarea esencial es la simulación informática de las explosiones nucleares. Dichas simulaciones resultan extremadamente sensibles a las condiciones iniciales, por cuya razón el NIF está diseñado para proporcionar datos a las mismas a partir de las explosiones en miniatura de deuterio y tritio. Por lo demás, la instalación se aprovechará para experimentos puramente científicos; uno de los primeros consistirá en un estudio de las ondas de choque en una supernova.

Sin embargo, cuando el NIF entró en servicio en mayo de 2009, su capacidad para generar energía ocupó mucho espacio en la prensa. Pero el NIF nunca pretendió ser una máquina capaz de generar energía utilizable. Según los pronósticos actuales, los experimentos de fusión de deuterio y tritio se iniciarán a finales del año en curso y, si todo va bien, el umbral de producción de energía se alcanzará en 2011.

No obstante, hay que tener en cuenta que no se trata de ninguna planta de fusión, sino únicamente de obtener más energía de la cápsula que la suministrada por los láseres (una cantidad que no incluye la energía neta necesaria para la fabricación de un láser de 4,2 megajoule, ni las pérdidas energéticas en el proceso de bombeo). Pese a todo, este hito se alcanzará previsiblemente unos 15 años antes que en el reactor termonuclear ITER.

Obstáculos para conseguir un reactor

Independientemente del procedimiento empleado (bombardeo con láser o confinamiento con campos magnéticos), los portadores de la energía obtenida en una reacción de fusión son los neutrones. Por ser neutras, estas partículas son inertes a los efectos de los campos electromagnéticos. Además, traspasan la mayoría de los materiales sólidos.

Lo único que puede lograr detener a un neutrón es su impacto contra un núcleo atómico. Pero los neutrones obtenidos en una reacción de fusión de deuterio y tritio son tan energéticos que desplazarían de sus posiciones a los átomos de un metal resistente (como el acero, por ejemplo). Con el tiempo, tales colisiones acabarían desgastando los componentes estructurales del reactor.

Por otro lado, los neutrones convierten también materiales inocuos en radiactivos. Cuando un neutrón choca contra un núcleo atómico, éste puede absorber el neutrón y volverse inestable. Un flujo continuo de neutrones (aunque proceda de una reacción supuestamente "limpia", como la fusión) acabaría por tornar radiactivo cualquier recipiente.

En cuanto a su funcionamiento, una planta de fusión ha de transformar la energía que aporten los neutrones en calor que, a su vez, accione una turbina. En los diseños de reacto-

BREVE HISTORIA DE LA FUSION

1950: El científico soviético Andrei Sakharov diseña una botella magnética, el *tokamak*, apropiada para confinar un plasma. Sus posteriores investigaciones sobre armas nucleares apartarían del proyecto a Sakharov.

1951: Lyman Spitzer, de la Universidad de Princeton, introduce el *Stellarator*, otro mecanismo de confinamiento magnético.

1952: Los EE.UU. detonan *Ivy Mike*, la primera bomba de hidrógeno.

1969: Científicos occidentales viajan a Moscú con el objeto de estudiar el *tokamak* de Sakharov. Descubren que produce un plasma más caliente y más denso que el del *Stellarator*. Los *tokamaks* juegan un papel fundamental en la investigación sobre fusión magnética.

1977: El láser *Shiva* intenta inducir la fusión mediante implosiones por láser.

2010: El Centro Nacional de Ignición, en EE.UU., tiene previsto comenzar sus experimentos de fusión de deuterio y tritio.

2018: Está programada la terminación del ITER. Los primeros ensayos de fusión de deuterio y tritio se prevén para 2026.

res futuros, se prevé que la conversión transcurra en una estructura envolvente, denominada "manto" (o "manto fértil y refrigerante"), emplazada alrededor de la región en la que la fusión tiene lugar. Aunque la probabilidad de que un neutrón determinado colisione con cualquier núcleo atómico individual sea pequeña, si el manto es lo suficientemente grueso y se compone del material adecuado (varios metros de acero, quizás), éste acabará capturando a casi todos los neutrones que lo penetren.

Las colisiones calentarían el manto y el calor se extraería mediante un refrigerante líquido; sal fundida, por ejemplo. La sal caliente se utilizaría posteriormente para hervir agua y, como en cualquier otro generador, el vapor accionaría una turbina para producir electricidad.

Pero este proceso no es tan sencillo. El manto ha de cumplir otra función adicional, tan crítica para el éxito final del reactor como la propia extracción de energía: ha de fabricar parte del combustible que el reactor necesita para su funcionamiento.

Aunque el deuterio es barato y abundante, el tritio escasea. Sólo podemos obtenerlo como subproducto de reacciones nucleares. Una central nuclear ordinaria puede producir de dos a tres kilogramos de tritio al año, a un coste estimado de entre 60 y 90 millones de euros por kilogramo. Desafortunadamente, una planta de fusión consumiría cerca de un kilogramo de tritio por semana. "La cantidad de tritio que requeriría un reactor de fusión supera en mucho la que pueden proporcionar los reactores de fisión ordinarios", señala Mohamed Abdou, director del Centro de Ciencia y Técnica de la Fusión de la Universidad de California en Los Angeles.

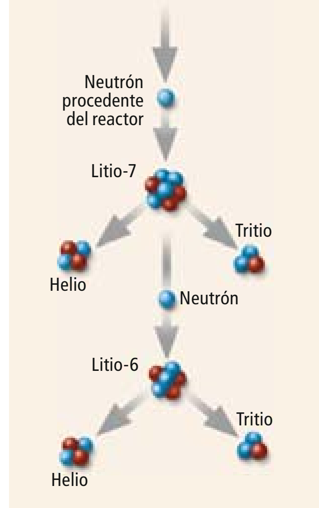
Para que una planta de fusión genere por sí misma el tritio que necesita, tendría que emplear en la tarea algunos de los neutrones que, de otro modo, se utilizarían para producir energía. Dentro del manto, unos canales de litio (un metal ligero y altamente reactivo) capturarían neutrones para producir helio y tritio. El tritio escaparía al exterior a través de los canales; sería capturado por el reactor y reinyectado al plasma.

Sin embargo, al tener en cuenta todos los detalles, el proceso no resulta ser tan eficiente. Cada reacción de fusión consume exactamente un núcleo de tritio y genera un único neutrón. Así pues, cada neutrón que salga del reactor debería convertirse en un núcleo de tritio para que el reactor no alcanzase en poco tiempo un déficit de combustible (al consumir más tritio del que produce). Este obstáculo sólo podría superarse si se lograse inducir una complicada cadena de reacciones. Primero, un neutrón colisiona con un isótopo de litio-7, el cual, aunque consume energía, produce un núcleo de tritio y un neutrón. Luego, este segundo neutrón choca con un isótopo de litio-6 y engendra un segundo núcleo de tritio.

Por añadidura, todo ese tritio se ha de recoger y reintroducir en el plasma con un rendimiento próximo al 100 por ciento. "En la reacción en cadena no puede perderse ni un solo neutrón, pues de lo contrario la reacción se detendría", asegura Michael Dittmar, del Instituto Técnico Federal Suizo de Zúrich. "Lo primero que hay que hacer [antes de construir un reactor] es demostrar que la producción de tritio es factible. Sobre esta cuestión no caben dudas."

"El manto de fusión es un artefacto muy ingenioso", razona Richard D. Hazeltine. "Admite gran cantidad de calor y lo administra sin sobrecalentarse; sus materiales son tan depurados que el bombardeo con neutrones no acorta sensiblemente su vida útil. Y, además, emplea esos neutrones para transformar litio en tritio."

Desafortunadamente, el ITER no experimentará con diseños de manto. Por esa razón, muchos científicos (especialmente estadounidenses, que no intervienen en el diseño, construcción o explotación del ITER) aducen que se requiere una instalación específica para diseñar y construir un manto. Mohamed Abdou sostiene que es preciso demostrar su viabilidad en un laboratorio, ya que tal dispositivo no se ha construido ni ensayado jamás. Abdou considera que, aunque un proyecto de tales características recibiera financiación mañana, harían falta entre 30 y 75 años para entender todas las cuestiones con el detalle requerido para abordar su construcción en una planta de energía operativa. "Creo que es factible", afirma, "pero a costa de un gran trabajo".



PRODUCCION DE TRITIO

Para usarlo como combustible, los reactores de fusión han de generar, a través de una compleja cadena de reacciones, su propio tritio. Primero, un neutrón impacta contra un núcleo de litio-7 del "manto" (una estructura que ha de envolver al foco de ignición). La reacción produce helio, tritio y un neutrón. Este segundo neutrón impacta después contra un núcleo de litio-6, también contenido en el manto. Esto genera otro núcleo de helio y otro de tritio.

RETOS

Para que la fusión se convierta en una fuente viable de energía deben superarse una serie de obstáculos:

Calor: Los materiales del reactor deben soportar temperaturas extremadamente altas durante varios años.

Estructura: Los neutrones de alta energía procedentes de las reacciones de fusión tornan quebradizos los materiales ordinarios.

Combustible: Un reactor de fusión tendría que generar su propio tritio en una compleja serie de reacciones.

Fiabilidad: La fusión inducida por láser sólo puede provocar implosiones intermitentes. Los sistemas magnéticos deberían mantener el plasma durante semanas, no segundos.

La gran mentira

Supongamos por un momento que se consigue. Estamos en 2050, tanto el NIF como el ITER han alcanzado éxitos rotundos y han cumplido con sus objetivos en cuanto a tiempo y coste presupuestado. La madre naturaleza no escondía más sorpresas desagradables, y los plasmas, siempre ingobernables, se han comportado según lo esperado al ir elevando la energía del sistema. El ensayo por separado de materiales ha demostrado que es posible construir un manto que logre generar tritio y convertir neutrones en electricidad, además de soportar las tensiones subatómicas propias del uso diario de una planta de fusión. Y supongamos también que el coste de una planta de fusión operativa no pasa de 8000 millones de euros. Pese a todo, ¿hablaríamos de una opción realmente útil?

JESSICA HUPPI



2. PLASMA ARDIENTE. Vista del plasma en el interior del Tokamak Superconductor del Proyecto Coreano de Investigación Avanzada (KSTAR), que comenzó a funcionar en 2008.

CORTESIA DEL INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACION DE LA FUSION (NFRI) DE COREA

La pregunta es de difícil respuesta, hasta para quienes han perseguido durante toda su vida el sueño de una fuente de energía basada en la fusión nuclear. El problema estriba en que una planta de fusión (al igual que las de fisión ordinarias) se utilizaría para generar “carga base”; es decir, una parte de la demanda eléctrica total, generada por la planta a potencia constante. Por tanto, para recuperar su elevado coste inicial, tendrían que permanecer siempre operativas. Como señala Charles Baker, antiguo director de los programas de fusión de los laboratorios de Argonne y Oak Ridge y actual presidente del comité asesor estadounidense en el ITER: “Cuando el sistema ha requerido una gran inversión inicial, debería mantenerse en servicio, dado que no hay que pagar por el combustible”.

Lamentablemente, resulta harto difícil mantener un plasma activo durante un lapso de tiempo apreciable. Hasta ahora los reactores han logrado mantener los plasmas durante algo menos de un segundo. La meta del ITER es que la ignición persista unas pocas decenas de segundos. Pero pasar desde ahí a la operación continua implica otro salto descomunal. “La fusión necesitará alcanzar una disponibilidad del 90 por ciento”, afirma Baker, cifra que incluye el tiempo necesario para las paradas de mantenimiento. “Este es, con mucho, el primer factor de incertidumbre cuando hablamos de la fiabilidad económica de los sistemas de fusión.”

Edward I. Moses, director del NIF, cree haber encontrado una solución. Ha propuesto un diseño de reactor híbrido de fusión y fisión, en el que los neutrones procedentes de las reacciones de fusión inducida por láser se utilizarían para generar reacciones de fisión en un manto formado por residuos nucleares ordinarios. Bautizado con el nombre LIFE (acrónimo del inglés “energía de fusión inercial por láser”), tal dispositivo podría conectarse a la red eléctrica de aquí a 20 años.

El sistema se basa en el hecho de que las centrales nucleares sólo consumen un 5 por ciento del uranio que se les suministra; el resto se expulsa y se almacena en un depósito a largo plazo. LIFE bombardearía con neutrones este combustible ya utilizado, con lo que se aceleraría su desintegración en elementos más ligeros y menos radiactivos, al tiempo que se generaría calor convertible en electricidad. Según Moses, LIFE podría competir con todas las fuentes energéticas existentes hoy en día y, quizás, hasta resultar más económico que todas ellas.

Por supuesto, ese sistema hipotético tampoco está exento de inconvenientes. “Cada programa tiene su gran mentira”, afirma Edward C. Morse, profesor de ingeniería nuclear en la Universidad de California en Berkeley. “En la fusión [por láser], la mentira es que sea posible fabricar las cápsulas de combustible a cinco céntimos cada una”, matiza. Las diminutas esferas de deuterio y tritio han de elaborarse con suma precisión, ya que han de exhibir una esfericidad casi perfecta para garantizar una compresión uniforme. Cualquier irregularidad impediría la implosión de la cápsula. Una particularidad que encarece prohibitivamente su proceso de producción.

El laboratorio de Livermore, que proyecta fabricar las cápsulas en la propia instalación, no anuncia su coste previsto. Pero el Laboratorio de Energía Láser de la Universidad de Rochester también produce cápsulas similares de deuterio y tritio; según Morse: “Hoy por hoy, el presupuesto en Rochester es de varios millones de dólares para elaborar unas seis dianas anuales; es decir, vienen a costar en torno a un millón por unidad”. Por otro lado, una central LIFE en servicio permanente consumiría unas 90.000 cápsulas al día.

Obviamente, es imposible predecir cuál será la situación energética mundial dentro de 20 años. Quizá la fusión sea más necesaria que nunca; o acaso avances significativos en energía solar, eólica u otros tipos de fuentes renovables hagan que la fusión resulte comparativamente costosa y difícil de manejar.

Hasta ahora, la fusión se había considerado como una opción energética esencialmente diferente de todas las demás, ajena a la contaminación asociada a los combustibles fósiles o a los peligros intrínsecos al uranio. Era limpia y pura, una solución permanente que pondría fin a nuestra sed de energía. El enfoque actual no es tan idealista. La fusión es sólo una opción más que, además, exigirá decenios de trabajo para rendir frutos. Quizás estemos muy próximos a la ignición, pero en ningún caso a la era de la energía sin límites.

Bibliografía complementaria

SUN IN A BOTTLE: THE STRANGE HISTORY OF FUSION AND THE SCIENCE OF WISHFUL THINKING. Charles Seife. Viking, 2008.

FUSION AS AN ENERGY SOURCE: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES. W. J. Nutall. Informe del Instituto de Física, septiembre de 2008. www.iop.org/activity/policy/Publications/file_31695.pdf

SAFE AND SUSTAINABLE ENERGY WITH LIFE. Amie Heller en *Science and Technology Review*. Publicación del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore, abril-mayo de 2009.

RESEARCH NEEDS FOR MAGNETIC FUSION ENERGY SCIENCES. Informe final de la conferencia, junio de 2009. www.burningplasma.org/renew.html

Bioincrustación

Maria Montseny, Josep Marlés y José Manuel Fortuño

Los fenómenos biológicos se suceden con gran rapidez en los medios acuáticos y, particularmente, en el medio marino. Se denomina bioincrustación (biofouling) a un conjunto de procesos biológicos relacionados con las primeras etapas de colonización de un sustrato sumergido. En el mar, la celeridad con que se produce dicha colonización es notable: en tan sólo unos días aparecen diferentes incrustaciones recubriendo la superficie de un sustrato que inicialmente se había sumergido impoluto.

El proceso plantea desde hace años problemas serios a la navegación, pues la bioincrustación origina una capa que se extiende sobre al casco de los barcos. La capa aumenta el rozamiento de las embarcaciones y, como consecuencia, reduce su velocidad y provoca un mayor consumo de combustible.

La colonización del sustrato empieza por bacterias, de mínimas exigencias nutritivas, que constituyen las biopelículas bacterianas, complejas estructuras formadas por los propios microorganismos embebidos en sustancias que ellos mismos segregan. Transcurrida una semana, diversas especies medran en la superficie de este sustrato inicial y acaban creando una primera capa de incrustación; distinguimos en ese conglomerado diversas especies de diatomeas bentónicas, serpúlidos y briozoos.

La colonización sigue un proceso de sucesión que da como resultado unas comunidades cada vez más complejas con el tiempo. De no limpiarlas periódicamente, las embarcaciones sufren una degradación progresiva.

▲ **1. Bioincrustaciones en un casco de barco sumergido durante un año. La mitad izquierda del casco contrasta con la mitad derecha, que se ha limpiado.**

LORENZO BRAMANTI (*casco de barco*); MARIA MONTSENY, JOSEP MARLES Y JOSE MANUEL FORTUÑO (*resto de las ilustraciones*)



▲ 2. Sustrato colonizado, una semana después de sumergirlo en el mar (*izquierda*). Se aprecia la dominancia de las algas que han crecido gracias al desarrollo de la biopelícula bacteriana (*derecha*), primer estadio esencial para que prosiga la colonización de otros organismos.

▲ 3. Microalgas bentónicas que rápidamente se asientan sobre los sustratos sumergidos en el mar o en los cascos de barcos.

▲ 4. Estado del sustrato, transcurridos 15 días. Se aprecia la dominancia de briozoos incrustantes y tubos de poliquetos serpúlidos.

◀ 5. Al cabo de un mes, el sustrato está cubierto de organismos; destacan poliquetos, briozoos y un balánido, que a su vez ya ha sido colonizado por poliquetos. Todos estos organismos desarrollan exoesqueletos calcáreos en los cascos de barcos que ofrecen una gran resistencia a la navegación.

La evolución de los Minerales

ROBERT M. HAZEN

La observación del reino mineral a lo largo del tiempo lleva a una sorprendente conclusión: la mayoría de las especies minerales deben su existencia a la vida

CONCEPTOS BASICOS

- Sólo se conoce una docena de minerales (compuestos cristalinos) entre los ingredientes que formaron el sistema solar hace 4600 millones de años. Sin embargo, la Tierra actual posee más de 4400 especies minerales.
- La diversa mineralogía de la Tierra desarrollada durante eones constituye el resultado de sucesivos episodios de producción de minerales.
- Más de la mitad de las especies minerales de la Tierra deben su existencia a la vida, que empezó a transformar la geología del planeta hace más de 2000 millones de años.

Hubo un tiempo en el que no había minerales. Las elevadas temperaturas posteriores a la gran explosión impidieron la formación de cualquier sólido. Debieron transcurrir más de medio millón de años hasta la aparición de los primeros átomos: hidrógeno, helio y un poco de litio. Muchos millones de años después, la atracción gravitatoria consiguió reunir esos gases en nebulosas y, más tarde, en las primeras estrellas densas e incandescentes.

Cuando las estrellas gigantes explotaron y se convirtieron en supernovas, se sintetizaron el resto de los elementos químicos que luego se esparcieron por el espacio. Durante la expansión y enfriamiento de los gases estelares, se formaron los primeros minerales. Pero incluso entonces, los elementos y sus componentes eran escasos y se hallaban dispersos, o bien eran muy volátiles; la presencia de átomos y moléculas era esporádica en el polvo y los gases estelares recién formados. Sin llegar a constituir verdaderos cristales (con diferentes composiciones químicas y los átomos organizados en una matriz de unidades repetidas), esos materiales desordenados no podían calificarse de minerales.

Los cristales microscópicos de diamante y de grafito, formas puras del abundante carbono, fueron probablemente los primeros minerales. Muy pronto se les unieron una docena de microcristales resistentes, entre ellos la moissanita (carburo de silicio), la osbornita (nitruro de titanio) y algunos óxidos y silicatos. Puede que durante decenas de millones de años esas recientes y escasas especies, los minerales primigenios, fueran los únicos cristales existentes en el universo.

Sin embargo, la Tierra actual cuenta con más de 4400 especies minerales. Y todavía quedan muchas por descubrir. ¿Cuál es la causa de la extraordinaria diversificación, desde una docena hasta miles de formas cristalinas? Hace poco, el autor y siete de sus colaboradores han presentado un nuevo enfoque, la “evolución mineral”, que pretende responder a esa pregunta. El concepto de evolución mineral es distinto del enfoque tradicional y centenario de la mineralogía, que considera los minerales objetos valiosos con distintas propiedades físicas y químicas, sin tener en cuenta el tiempo, la cuarta dimensión fundamental de la geología. El criterio nuevo emplea, en cambio, la historia de la Tierra como marco de referencia para conocer los minerales y los procesos que los han creado.

El autor y su grupo pronto se dieron cuenta de que la evolución mineral se inició con la aparición de los planetas rocosos; los planetas son auténticas fábricas de minerales. Observaron que, en el transcurso de los últimos 4500 millones de años, la Tierra había atravesado



una serie de etapas y, en cada una de ellas, habían surgido nuevos fenómenos que alteraron y enriquecieron de manera espectacular la mineralogía de la superficie terrestre.

Algunos detalles de esa historia son objeto de un intenso debate, que sin duda se aclararán con los futuros descubrimientos, pero la idea general de la evolución mineral constituye un hecho admitido ya por la comunidad científica. Los investigadores no presentan datos controvertidos ni teorías nuevas y radicales sobre lo que sucedió en cada fase de la historia de la Tierra. Antes bien, reformulan los acontecimientos del pasado utilizando la evolución mineral como criterio rector.

El autor pone de relieve una idea fascinante: la mayoría de los miles de minerales de la Tierra debe su existencia al desarrollo de la vida en nuestro planeta. Rompe la imagen de un mundo inerte sobre el que la vida se va asentando de modo progresivo, para proponer una evolución paralela de lo orgánico y lo inorgánico. Esta afirmación tiene, además, nuevas implicaciones en la búsqueda de vida en otros planetas. Los minerales, más resistentes, y no los inestables restos orgánicos,

Instantáneas de la mineralogénesis

En los 4600 millones de años siguientes a la formación del sistema solar, el número de minerales ha evolucionado desde unos inicios modestos —aproximadamente una docena de minerales en la nebulosa presolar— hasta los más de 4400 especies de la Tierra actual. El planeta ha atravesado una serie de estadios, representados a la derecha y en las páginas siguientes en cinco imágenes, caracterizados por diversos procesos de formación de minerales. Algunos de esos procesos crearon minerales nuevos, mientras que otros transformaron el aspecto del planeta al aumentar la presencia de antiguos minerales raros.



Formación de la Tierra

HACE 4600 MILLONES DE AÑOS: En el anillo de polvo y gas remanentes tras la ignición del Sol (*al fondo*), surgen millones de planetesimales que chocan y originan la Tierra (*planeta incandescente*). En los planetesimales se desarrollan más de 200 minerales, como la olivina y el circón, gracias a la fusión de sus materiales, el impacto de las colisiones y las reacciones con el agua. Muchos de estos minerales se encuentran en los antiguos meteoritos condríticos.

◀ Circón

◀ Cristales de olivina de pallasita (meteorito)

▶ Condrita (meteorito)

nos proporcionan los indicios más sólidos y fiables de la biología.

Formación de la Tierra

Los planetas se formaron en nebulosas estelares que, a su vez, se habían originado de la materia de supernovas. La mayor parte de la masa de una nebulosa colapsa y se crea la estrella central, pero los materiales restantes giran alrededor de la estrella y configuran un vasto disco. Esos restos se van agrupando en fragmentos cada vez mayores: arena, grava y agregados del tamaño de un puño. Están constituidos por polvo que alberga un limitado repertorio de minerales primigenios (alrededor de una docena), junto con otras combinaciones de átomos y moléculas.

Cuando se inicia la combustión de una estrella, se producen cambios espectaculares en su entorno. En nuestro sistema solar, la ignición estelar tuvo lugar hace unos 4600 millones de años. Los pulsos de calor procedentes de un Sol incipiente fundieron y volvieron a mezclar los elementos, creándose nuevos cristales. En ese estadio de la evolución mineral surgieron las primeras aleaciones de hierro y níquel, sulfuros, fosfuros y una multitud de óxidos y silicatos. En la mayoría de los meteoritos primitivos se observan muchos de esos minerales en los "cóndrulos", gotículas de roca fundida que luego se solidificaron. (Los antiguos meteoritos condríticos ofrecen pruebas de la existencia de los minerales primigenios anteriores a los cóndrulos. La mineralogía los ha identificado como partículas nanoscópicas y microscópicas.)

En la primitiva nebulosa solar, los cóndrulos pronto se agregaron y formaron los planetesimales. Algunos crecieron hasta superar los 150 kilómetros de diámetro y, alcanzado tal tamaño, empezaron a fundirse y a diferenciarse en capas de distintos minerales y un núcleo denso y rico en metales. Las frecuentes colisiones en el abigarrado entorno solar provocaron intensas sacudidas y un nuevo ascenso de las temperaturas, con la consiguiente alteración de los minerales en los planetesimales mayores.

El agua intervino también. En la nebulosa presolar ya existía en forma de partículas de hielo y, en los planetesimales, las partículas se fundieron y se agregaron en las fisuras. Las reacciones químicas con el agua generaron nuevos minerales.

Surgirían unas 250 especies minerales diferentes como consecuencia de los dinámicos procesos de formación de los planetas. Esos 250 minerales se convirtieron en la materia prima con que se constituyeron los planetas rocosos y se encuentran aún hoy en los meteoritos que impactan sobre la Tierra.

Tierra negra

La Tierra primigenia continuó creciendo. Los grandes planetesimales engulleron, por miles, a los más pequeños hasta que sólo quedaron dos rivales de gran tamaño compitiendo en

El autor

Robert M. Hazen, investigador del Laboratorio de Geofísica de la Institución Carnegie y catedrático de Ciencias de la Tierra en la Universidad George Mason, obtuvo el doctorado en Ciencias de la Tierra por la Universidad de Harvard en 1975. Es autor de 350 artículos científicos y 20 libros, entre los que destaca *Génesis: The Scientific Quest for Life's Origin*. Las últimas investigaciones de Hazen se centran en el papel de los minerales en el origen de la vida. El mineral hazenita, resultado de la precipitación de la actividad microbiana en las alcalinas aguas del lago Mono, en California, lleva su nombre.

RON MILLER (*ilustraciones*); MUSEO DE HISTORIA NATURAL, LONDRES (*pallasita*); SCIENTIFICA *Getty Images* (*circonita*); MASSIMO BREGA *Photo Researchers, Inc.* (*condrita*)

Tierra negra

HACE 4400 MILLONES DE AÑOS: La superficie sin vida de la Tierra, en el eón Hadeano, está constituida sobre todo por basalto negro, una roca formada a partir de magma fundido y lava. Los siguientes 2000 millones de años presenciarán el origen de 1500 especies minerales. La repetición de la fusión parcial de las rocas concentra los elementos escasos y dispersos, como el litio (encontrado en la lepidolita), el berilio (en el berilo) y el boro (en la turmalina). A ello también contribuyeron las reacciones químicas y la meteorización por los océanos y la atmósfera anóxica. Con la tectónica de placas, afloraron en superficie los minerales formados a alta presión, como la jadeíta.

▲ Lepidolita

▶ Berilo

una misma: la prototierra y un cuerpo de menor tamaño que Marte, Theia (la madre de la diosa griega de la Luna). En un episodio final de violencia inconcebible, Theia rozó la prototierra, pulverizando sus capas más externas y provocando la expulsión de 100 billones de toneladas de roca incandescente que luego formaron la Luna.

Esos acontecimientos explican el alto momento angular del sistema Tierra-Luna y algunas características poco corrientes del satélite. Por ejemplo, el hecho de que su composición coincida en gran medida con la del manto terrestre (la capa de casi 3000 kilómetros de espesor que se extiende desde el núcleo de hierro y níquel hasta la capa más externa, la corteza, de un espesor de entre 5 y 50 kilómetros).

Después de la colisión que dio origen a la Luna, hace unos 4500 millones de años, la Tierra fundida empezó a enfriarse, proceso que todavía hoy continúa. Aunque la primitiva superficie de la Tierra albergara docenas de elementos raros (uranio, berilio, oro, arsénico, plomo y muchos más), con capacidad para producir una variedad de minerales, el impacto de Theia supuso una especie de "reinicio" cósmico. Las capas más externas de la Tierra se mezclaron entre sí y los elementos raros se dispersaron demasiado para poder generar cristales. Nuestro planeta era un mundo hostil, bombardeado sin cesar por restos nebulares y cubierto en gran parte por una capa de negro basalto, un tipo de roca que se sigue generando cuando la lava se solidifica.



◀ Turmalina

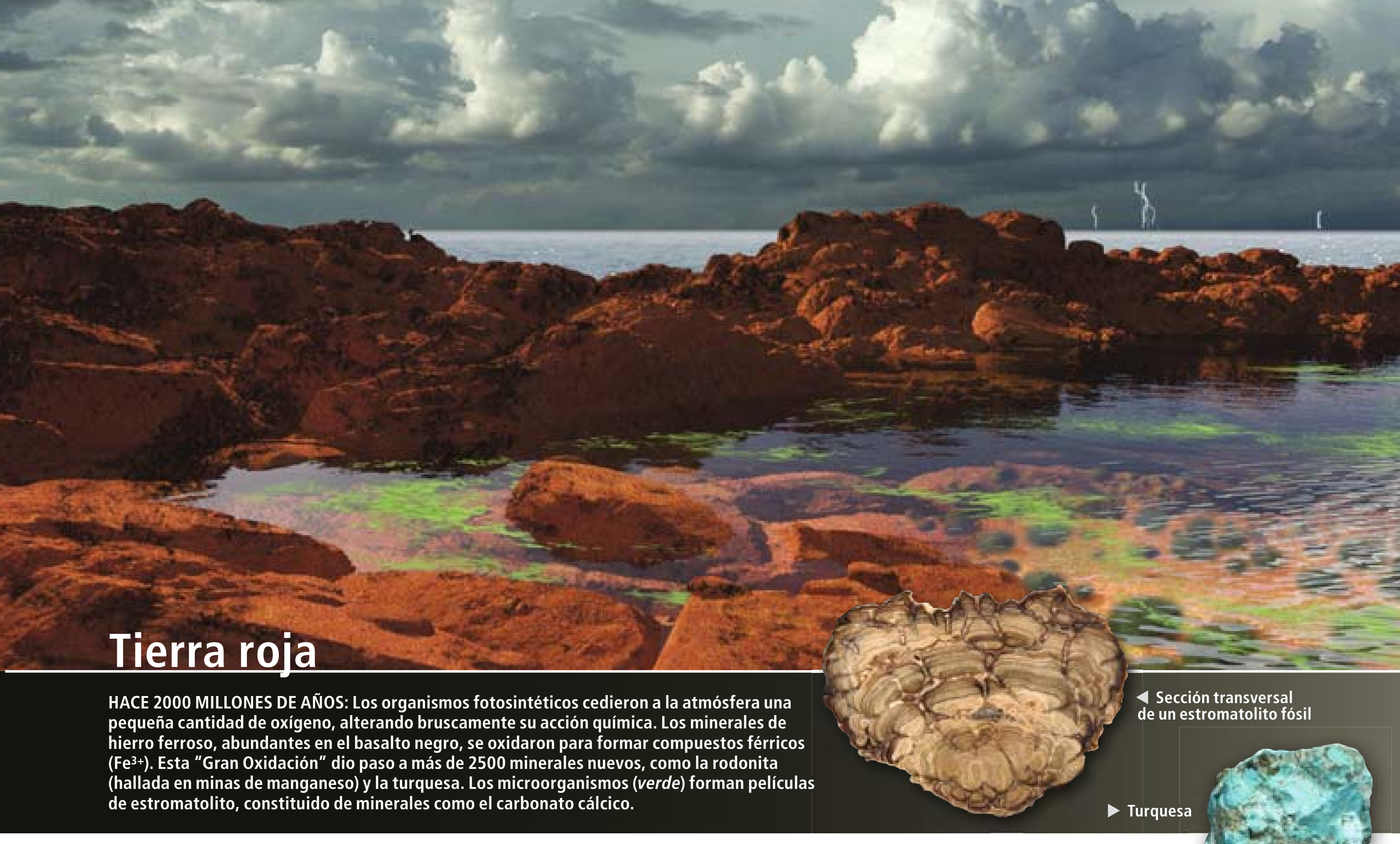
BIOPHOTO ASSOCIATES *Photo Researchers, Inc. (lepidolita)*; SCIENTIFICA *Getty Images (berilio)*; JACANA *Photo Researchers, Inc. (turmalina)*

La reiterada fusión parcial de granitos concentró elementos raros e "incompatibles".

La diversidad mineralógica de la Tierra aumentó de manera gradual durante el eón Hadeano, sobre todo por la reiterada fusión y solidificación de la corteza rocosa, pero también por las reacciones de meteorización provocadas por la atmósfera y los océanos primitivos. Los innumerables ciclos de fusión y solidificación, así como las interacciones entre la roca y el agua (con la disolución de algunos compuestos), fueron acercando los elementos raros entre sí hasta crear una nueva generación de minerales.

No todos los planetas poseen semejante potencial de formación de minerales. Mercurio, de pequeño tamaño y sin agua, al igual que la árida Luna, se congelaron antes de poder experimentar muchos procesos de fusión. Se estima que en ellos no habrá más de 350 especies minerales diferentes. Marte, con una modesta reserva de agua, podría poseer algunas más, como las arcillas y las evaporitas, especies hidratadas que se forman cuando se secan los océanos. Se calcula que las sondas de la NASA identificarán hasta 500 minerales distintos en el planeta rojo.

La Tierra es mayor, más caliente y contiene más agua; dispone, por tanto, de más mecanismos para generar minerales. Todos los planetas rocosos experimentaron vulcanismo y arrojaron basalto a la superficie. Además, la Tierra (y quizá Venus, de tamaño similar) poseía el suficiente calor interno para fundir de nuevo una parte del basalto expulsado y crear rocas ígneas granitoides, como los granitos grises y



Tierra roja

HACE 2000 MILLONES DE AÑOS: Los organismos fotosintéticos cedieron a la atmósfera una pequeña cantidad de oxígeno, alterando bruscamente su acción química. Los minerales de hierro ferroso, abundantes en el basalto negro, se oxidaron para formar compuestos férricos (Fe^{3+}). Esta "Gran Oxidación" dio paso a más de 2500 minerales nuevos, como la rodonita (hallada en minas de manganeso) y la turquesa. Los microorganismos (*verde*) forman películas de estromatolito, constituido de minerales como el carbonato cálcico.

◀ Sección transversal de un estromatolito fósil

▶ Turquesa

▼ Rodonita

pardos. Los granitos son mezclas de cuarzo (los granos de arena más abundantes en la playa), feldespato (el mineral más frecuente en la corteza terrestre) y mica (que forma láminas muy finas y brillantes). En los grandes planetesimales se habían producido ya pequeñas cantidades de esos minerales, pero en la Tierra se hicieron muy abundantes gracias a los procesos de formación de granito.

La repetida fusión parcial de los granitos en nuestro planeta acercó elementos raros e "incompatibles" que no habían hallado un lugar estable en las estructuras cristalográficas más corrientes. Se originaron así rocas con más de 500 minerales distintos, como los cristales gigantes de especies ricas en litio, berilio, boro, cesio, tántalo, uranio y una docena de otros elementos raros. Se necesita mucho tiempo —algunos científicos calculan más de 1000 millones de años— para que esos minerales se concentren en cuantía suficiente y formen minerales.

La actividad en el planeta gemelo de la Tierra, Venus, debió de durar lo suficiente para permitir fenómenos similares, pero ni Marte ni Mercurio han mostrado indicios significativos de granitización en la superficie.

La Tierra adquirió aún más diversidad mineral gracias a la tectónica de placas: proceso que genera corteza nueva a lo largo de cadenas volcánicas y, al mismo tiempo, elimina la más antigua en las zonas de subducción, donde una placa se desliza bajo otra y retorna al manto.

En un instante geológico, la fotosíntesis realizada por los nuevos tipos de algas provocó la Gran Oxidación.

Al hundirse la corteza, se fundieron parcialmente enormes cantidades de rocas hidratadas y de composición química diversa; la concentración de elementos raros aumentó aún más. Centenares de nuevos minerales se acumularon en vastos depósitos de sulfuros, que en la actualidad proporcionan algunas de las reservas más ricas en minerales metálicos. Y en la superficie de la Tierra emergieron otros cientos de especies cuando las fuerzas tectónicas hicieron ascender y dejaron al descubierto rocas de lugares profundos. Estaban provistas de minerales característicos originados a altas presiones, como la jadeíta (uno de los dos minerales del jade).

Con todo, durante las transformaciones de la corteza y el manto en los primeros 2000 millones de años de existencia de la Tierra se habrían generado unas 1500 especies minerales, hoy presentes en la superficie terrestre o muy cerca de ella. No obstante, la mineralogía ha clasificado más de 4400 especies minerales. ¿Qué hizo triplicar entonces la diversidad mineral de nuestro planeta?

Tierra roja

La respuesta se halla en la propia vida. La biosfera, que distingue la Tierra de los demás planetas y lunas conocidos, ha alterado de modo definitivo el entorno próximo a la superficie; se advierte con mayor nitidez en los océanos y la atmósfera, aunque también en las rocas y los minerales.

RON MILLER (*ilustraciones*); SCIENTIFICA *Getty Images* (*rodonita*); TED KINSMAN *Photo Researchers, Inc.* (*estromatolito*); E. R. DEGGINGER *Photo Researchers, Inc.* (*turquesa*)

Tierra blanca

HACE 700 MILLONES DE AÑOS: El cambio climático cubrió durante millones de años la superficie del planeta con un único mineral: el hielo. Finalmente, el dióxido de carbono procedente de los volcanes desencadenó un calentamiento global. El planeta oscila entre las glaciaciones y los cálidos períodos interglaciares. En los períodos interglaciares, la meteorización aporta al paisaje enormes cantidades de minerales arcillosos (de grano fino), como la caolinita. Las capas diferenciadas de carbonatos depositados en océanos cálidos y someros contienen cristales de hasta dos metros de altura.

▲ Caolinita

▶ Hielo

COURTESY OF ALAN JAY KAUFMAN (*capa de carbonato*); TED KINSMAN *Photo Researchers, Inc.* (*caolinita*); SCIENCE SOURCE *Photo Researchers, Inc.* (*cristal de hielo*)

Las primeras manifestaciones de la vida —los primitivos organismos unicelulares que se alimentaban de la energía química de las rocas— apenas si ejercieron efecto alguno sobre la diversidad mineralógica de la Tierra. La geología ha identificado rocas de origen biológico de unos 3500 millones de años de antigüedad, como los arrecifes compuestos de carbonato cálcico y las formaciones de hierro bandeado (donde los óxidos de hierro han atrapado el primer oxígeno sintetizado por seres vivos). Mas, en ese tiempo, los continentes seguían yermos, gran parte de la atmósfera carecía de oxígeno, los procesos de meteorización eran muy lentos y los organismos iniciales apenas modificaban el número de minerales o su distribución.

Tal situación cambió con el rápido incremento del oxígeno en la atmósfera, gracias a la aparición de la fotosíntesis en unos nuevos tipos de algas. El debate sobre ese período de transición, la Gran Oxidación, continúa vivo. En concreto, la ciencia no ha determinado con exactitud cuándo y a qué velocidad empezó. De todos modos, hace unos 2200 millones de años, el oxígeno atmosférico superó el uno por ciento de los valores actuales, cantidad pequeña pero suficiente para transformar en adelante la mineralogía de la superficie terrestre.

Los modelos químicos aplicados por nuestro equipo indican que la Gran Oxidación creó las condiciones para la formación de 2500 minerales nuevos. Muchos de ellos son



▲ Capa de carbonato

materiales oxidados e hidratados, resultado de la meteorización de otros minerales. Como es poco probable que ello sucediera en un medio anóxico, los procesos bioquímicos terrestres debieron contribuir, directa o indirectamente, al origen de la mayoría de las 4400 especies minerales conocidas.

Gran parte de los minerales se generaron como finas películas de material alterado en la superficie de antiguas rocas. Muchas especies minerales raras se conocen sólo por un puñado de cristales preciosos que apenas pesan un gramo. Pero la Gran Oxidación tuvo también consecuencias mineralógicas de alcance mundial. El planeta cambió de coloración: el negro basalto que antes dominaba el paisaje se tornó rojo, a medida que el hierro ferroso (Fe^{2+}) de los minerales comunes del basalto se oxidaba formando hematites y otros compuestos de hierro férrico (Fe^{3+}). Vistos desde el espacio, los continentes de hace 2000 millones de años debieron parecerse a la superficie de Marte, aunque el azul de los océanos y el blanco de las nubes deberían ofrecer un contraste de colores espectacular.

El color rojo de Marte se debe también a reacciones de oxidación. Allí, el oxígeno se produjo por la disociación solar del agua en la alta atmósfera, liberándose el hidrógeno hacia el espacio. El proceso oxidó en parte la superficie del planeta, pero, al ser de menor magnitud, no dio lugar a los miles de minerales de la Tierra, sumamente oxidada y con una mayor actividad geológica.

Tierra verde

HACE 400 MILLONES DE AÑOS: Aparecieron los organismos pluricelulares: las plantas, seguidas de los animales, colonizaron los continentes. La fragmentación bioquímica por plantas y hongos incrementó, en varios órdenes de magnitud, la meteorización de las rocas y la producción de arcillas (mezclas de minerales hidratados). La superficie de la Tierra adoptó su actual aspecto y distribución de minerales. La vida originó en poco tiempo minerales como el aragonito y la calcita (hallada en casi todas partes, desde los trilobites hasta el esqueleto humano), y también minerales muy raros, como la hazenita, producida por microorganismos.

▲ Aragonito

▶ Fósil de trilobites

Tierra blanca

En los 1000 millones de años posteriores a la Gran Oxidación, apenas se produjeron acontecimientos de interés mineralógico. Ese intervalo del Océano Intermedio fue un tiempo de escasa actividad biológica y mineralógica.

El adjetivo "intermedio" alude a los niveles de oxidación: mientras las aguas oceánicas más próximas a la superficie se oxigenaron, las más profundas permanecieron anóxicas. Aunque la interfaz entre ambos dominios se fue ahondando de manera gradual, no emergieron nuevas formas de vida reseñables ni tampoco se crearon muchas especies minerales ex novo.

Por el contrario, en los 100 millones de años subsiguientes al Océano Intermedio, la superficie de la Tierra experimentó una notable transformación. Hace unos 800 millones de años, la mayoría de las masas continentales del planeta se agrupaban en un mismo supercontinente, Rodinia, cerca del ecuador. La tectónica de placas fragmentó esa inmensa masa continental, con el consiguiente aumento de la línea de costa. Como resultado, las precipitaciones adquirieron mayor intensidad y se aceleró la erosión de las rocas, procesos que extrajeron dióxido de carbono de la atmósfera. A medida que se debilitaba el efecto invernadero y se enfriaba el clima, el hielo polar se iba extendiendo.

Al crecer la superficie de hielo y nieve, aumentó la reflexión de la luz solar hacia el espacio y se redujo el efecto calorífico del Sol. Cuanto más se extendía el hielo, más se enfriaba el planeta. Durante 10 millones de años o más, la Tierra parecía una bola de nieve gigantesca, con unos cuantos volcanes activos que emergían entre la blanca superficie. Según algunos cálculos, la temperatura media global descendió hasta –50 grados centígrados.



▲ Hazenita

La actividad de la Tierra no se detuvo. Los volcanes continuaron expulsando dióxido de carbono. Pero sin precipitaciones y apenas meteorización, el gas no se eliminaba de la atmósfera. Sus niveles ascendieron muy despacio hasta alcanzar valores cien veces superiores a los actuales, y se desencadenó un ciclo de calentamiento por el efecto invernadero del gas. Al fundirse el hielo ecuatorial, el calentamiento se aceleró y, en unos cientos de años, la Tierra helada se transformó en un invernadero.

En los siguientes 200 millones de años, la Tierra osciló unas dos a cuatro veces entre esos dos estados extremos. Aunque en tan agitados tiempos aparecieron pocas especies minerales, la distribución de los minerales en la superficie terrestre cambió drásticamente con cada nuevo ciclo glacial. Durante los períodos interglaciares, se estimuló la formación de minerales arcillosos y otros productos de la meteorización en el yermo y rocoso paisaje continental. En las someras aguas de los cálidos océanos, precipitaron los carbonatos.

Los sucesivos períodos de glaciación e interglaciares tuvieron profundas consecuencias para la vida. En las glaciaciones desaparecían la mayoría de los ecosistemas, mientras que en los intervalos cálidos existían bruscos in-

RON MILLER (*ilustración*); E. R. DEGGINGER *Photo Researchers, Inc.* (*aragonita*); CORTESIA DE CHIP CLARK *Institución Smithsoniana, Museo Nacional de Historia Natural* (*trilobites*); CORTESIA DE HEXIONG YANG (*hazenita*)

crementos de la productividad biológica. En concreto, al final de la última gran glaciación el oxígeno atmosférico ascendió de repente, desde una concentración muy baja hasta alrededor del 15 por ciento, debido en parte a la enorme proliferación de algas litorales. Muchos biólogos sostienen que esos niveles tan altos de oxígeno representaron una condición fundamental para el origen y la evolución de los grandes animales, de elevadas demandas metabólicas. De hecho, según el registro geológico, los primeros organismos pluricelulares conocidos aparecieron cinco millones de años después de la última gran glaciación.

La coevolución de la geosfera y la biosfera ha proseguido hasta nuestros días, especialmente desde que diversos microorganismos y animales lograron fabricar sus propias conchas minerales protectoras. El desarrollo de los esqueletos carbonatados aportó la acumulación de inmensos arrecifes calcáreos que salpicaron el paisaje de incontables acantilados y cañones. Si bien tales minerales no entrañaban novedad alguna, su abundancia no tenía precedentes.

Tierra verde

La Tierra ha resultado inhóspita durante la mayor parte de su existencia. La radiación ultravioleta del Sol destruye las biomoléculas esenciales y elimina la mayoría de las células. Al aumentar la concentración de oxígeno atmosférico, se desarrolló una capa de ozono estratosférica que protegió la superficie de los rayos ultravioletas, lo suficiente para albergar la biosfera terrestre.

La vida tardó en prosperar sobre la Tierra. Después de las glaciaciones debieron de asentarse mantos de algas en los terrenos pantanosos. Pero la mayor transformación sucedió hace 460 millones de años con el desarrollo de los musgos, las primeras plantas realmente terrestres. La colonización generalizada de la Tierra necesitó otros 10 millones de años, cuando crecieron las plantas vasculares con raíces que penetraban en el terreno rocoso en busca de sujeción y suministro de agua.

Las plantas y los hongos introdujeron nuevos mecanismos de descomposición química de la roca. El ritmo de meteorización del basalto, el granito y la caliza aumentó en un orden de magnitud. Se intensificó la producción de minerales arcillosos y la velocidad de formación de suelos, lo que a su vez extendió el hábitat para nuevos hongos y plantas de mayor porte.

Hace unos 400 millones de años, en el Devónico, la superficie terrestre ya se parecía a la de nuestros días. Habían prosperado los bosques, habitados por un creciente número de insectos, tetrápodos y otros animales. Gracias a la profunda influencia de la vida, la mineralogía de la superficie de la Tierra alcanzó su actual estado de diversidad y distribución.

El futuro de la evolución mineral

La visión de la mineralogía terrestre como un proceso dinámico y transformador abre interesantes vías de investigación. Sobresale un hecho: los planetas han alcanzado diferentes estadios de evolución mineral. Los mundos pequeños y áridos, como Mercurio y la Luna, presentan superficies de baja diversidad mineral. En cambio, la superficie de Marte, planeta pequeño pero con agua, ofrece una variabilidad algo mayor. La Tierra y Venus, de mayor tamaño y con reservas de calor interno y materiales volátiles, tuvieron más posibilidades de formar granitoides.

Sin embargo, el origen de la vida y la coevolución de los seres vivos y los minerales han hecho de la Tierra un caso singular. Como ya se ha comentado, los minerales pueden ser tan útiles como los restos orgánicos para identificar señales de vida en otros planetas. Por dar un ejemplo: sólo allí donde exista vida la oxidación será generalizada.

Además, los mundos de composiciones diferentes pueden demostrar distintas evoluciones minerales. Io, satélite de Júpiter y rica en sulfuros, y Titán, fría luna de Saturno y abundante en hidrocarburos, deben poseer series dispares de minerales. Lo mismo puede decirse de Europa o Encélado (lunas de Júpiter y Saturno, respectivamente), de las que se cree albergan océanos de agua líquida bajo sus superficies heladas y, por lo tanto, lugares donde buscar vida extraterrestre.

La observación de los minerales en un contexto evolutivo también ayuda a entender una cuestión más general sobre la evolución de los sistemas en el cosmos. En múltiples situaciones, se avanza desde estadios simples hacia estadios cada vez más complicados: la evolución de los elementos químicos en las estrellas, la evolución mineral en los planetas, la evolución molecular que rige el origen de la vida y la evolución biológica mediante la selección natural darwinista.

Así pues, vivimos en un universo que tiende a ganar en complejidad: los átomos de hidrógeno forman la estrellas, las estrellas forman los elementos de la tabla periódica, los elementos forman planetas, y éstos, a su vez, forman minerales en abundancia. Los minerales catalizan la síntesis de biomoléculas que, en la Tierra, han dado lugar a la vida. En ese asombroso escenario, los minerales representan un eslabón inevitable en la evolución del cosmos.

Para identificar señales de vida en otros mundos, los minerales resultan no menos valiosos que los restos orgánicos.

Bibliografía complementaria

PLANETARY MATERIALS. Dirigido por J. J. Papike. Mineralogical Society of America, 1998.

THE EMERGENCE OF EVERYTHING: HOW THE WORLD BECAME COMPLEX. Harold J. Morowitz. Oxford University Press, 2002.

LIFE IN A YOUNG PLANET: THE FIRST THREE BILLION YEARS OF EVOLUTION ON EARTH. Andrew H. Knoll. Princeton University Press, 2003.

CHEMICAL EVOLUTION ACROSS TIME AND SPACE: FROM BIG BANG TO PREBIOTIC CHEMISTRY. Dirigido por Lori Zaikowski y Jon M. Friedrich. American Chemical Society, 2007.

MINERAL EVOLUTION. Robert M. Hazen et al. en *American Mineralogist*, vol. 93, págs. 1693-1720; 2008.

Ecofisiología del calamar gigante

Este imponente cefalópodo constituye un excelente bioindicador para el estudio del impacto del cambio climático global y la contaminación antropogénica en la fisiología, el reclutamiento y las variaciones de biomasa en los ecosistemas marinos profundos

Angel Guerra y Angel F. González

CONCEPTOS BASICOS

- *Architeuthis* se halla sobre todo en áreas próximas a profundidades abisales, con una productividad elevada, cañones submarinos y masas de agua fría y bien oxigenada.
- Los estudios isotópicos de nitrógeno y carbono muestran que los calamares gigantes experimentan un cambio de hábitat y dieta durante su ciclo biológico: conforme envejecen, medran a profundidades mayores y se alimentan en niveles tróficos superiores.
- Los calamares gigantes alcanzan unos cuatro años de edad, si bien un estudio estima su esperanza de vida en catorce años. La forma de copulación más plausible es "cabeza contra cabeza".

Han transcurrido casi treinta años desde que se publicó en esta revista el artículo de Clyde Roper y Kenneth Boss sobre el calamar gigante *Architeuthis* [*véase* "El calamar gigante", por Clyde F. R. Roper y Kenneth J. Boss; Investigación y Ciencia, junio 1982]. Sugerimos ahora que dichos colosos marinos sean considerados invertebrados emblemáticos, a efectos de la conservación de la biodiversidad y de los ecosistemas. Nuestra propuesta se apoya en sus particularidades biológicas y ecológicas, que proporcionan luces para estudiar los efectos del cambio climático sobre la biodiversidad y el ambiente. Asimismo, el calamar gigante es un bioindicador de la salud de ecosistemas tan complejos como los cañones submarinos, que encierran una gran diversidad de hábitats y especies poco conocidas. Por fin, cabe resaltar que se trata de una especie amenazada por la pesca y las prospecciones acústicas en aguas profundas.

Durante los últimos años se ha ahondado en la biología de *Architeuthis*, pero son muchos todavía los enigmas pendientes. Sirva este artículo para revisar y actualizar los conocimientos sobre este formidable cefalópodo.

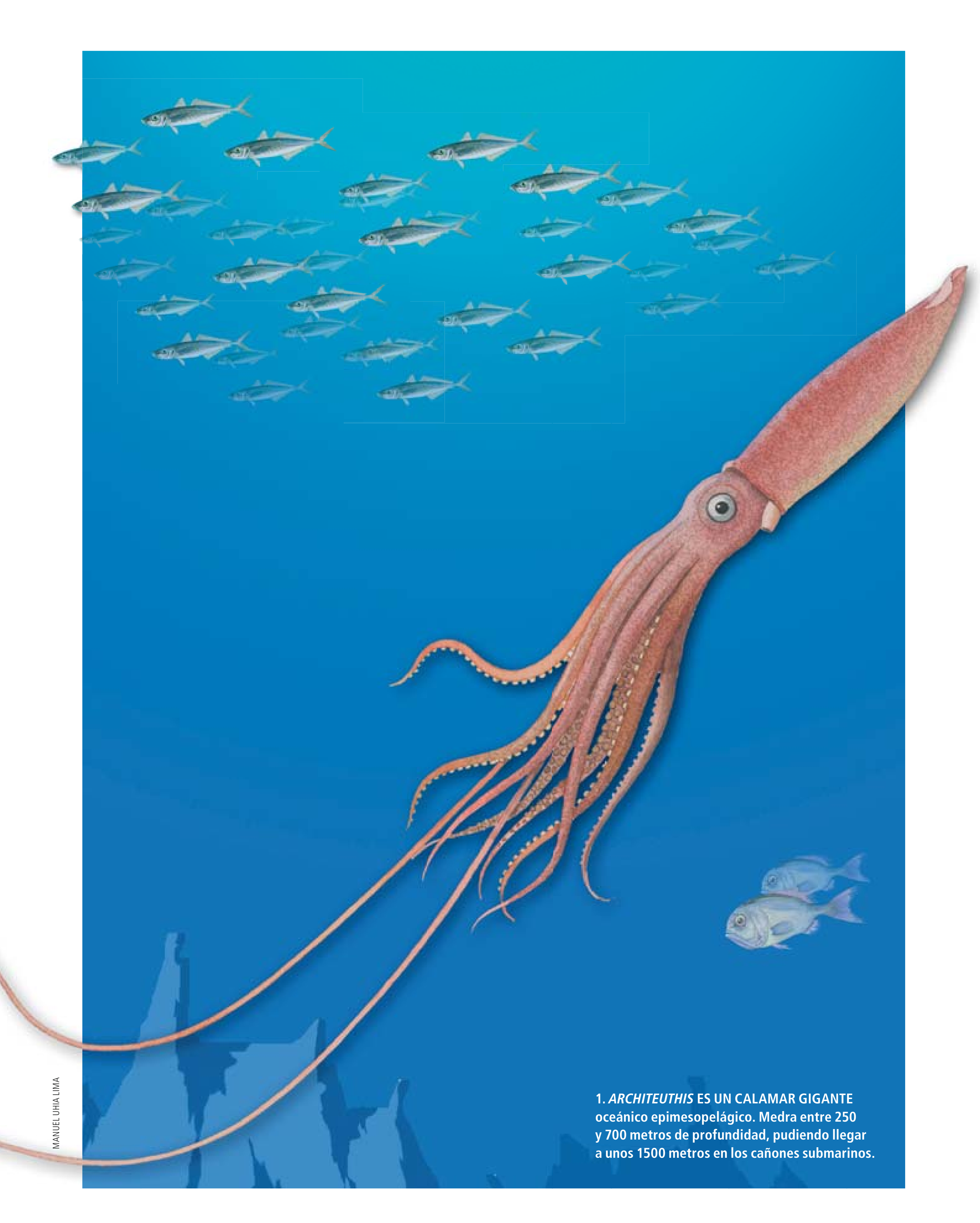
Sistemática confusa

En la actualidad hay registradas 21 especies dentro del género *Architeuthis*. Sin embargo, la mayoría están descritas de forma inadecuada o insuficiente, por lo que se desconoce su número real. La situación sistemática de este taxón es, pues, bastante confusa.

¿Cuál es realmente el número de especies de *Architeuthis*? La opinión más generalizada propone la existencia de una única especie, *Architeuthis dux*, compuesta por tres subespecies: *Architeuthis dux dux* en el Atlántico, *A. dux martensii* en el Pacífico Norte y *A. dux sanctipauli* en el hemisferio sur. Hay quienes declaran que estas tres subespecies deberían elevarse al rango de especie. Por último, otros opinan que habría al menos cinco o seis especies: *A. dux* en el Atlántico Norte; *A. sanctipauli*, propia de una extensa área que comprende la región subantártica y antártica de los océanos Atlántico, Indico y Pacífico; *A. kirkii* en aguas de Nueva Zelanda; *A. martensii*, propia del Pacífico Norte; y otras dos más, todavía sin identificar, del Atlántico Sur y del océano Indico y Pacífico meridional, respectivamente.

Distribución geográfica

Las áreas de distribución de organismos asequibles, vistosos o de importancia comercial suelen estar bien documentadas. Sin embargo, para numerosos grupos de organismos menos vistosos, menos asequibles o de menor interés comer-



1. *ARCHITEUTHIS* ES UN CALAMAR GIGANTE oceánico epimesopelágico. Medra entre 250 y 700 metros de profundidad, pudiendo llegar a unos 1500 metros en los cañones submarinos.



2. *ARCHITEUTHIS* ES COSMOPOLITA. Con todo, los registros se concentran en seis zonas oceánicas: alrededor de las costas de Terranova, en el norte de la península Ibérica, en aguas de Namibia y Sudáfrica, alrededor de las costas de Japón, en las costas noroccidentales de Norteamérica y en la zona que comprende Nueva Zelanda y las aguas australianas.

cial, los conocimientos son escasos. Este sería el caso de *Architeuthis*, un cefalópodo pelágico que cuenta con la dificultad añadida de ser un género compuesto por varias subespecies o razas, o por varias especies. Pese a tratarse de un molusco cosmopolita, presenta una distribución agregada; ello podría deberse al sesgo de un muestreo insuficiente o al hecho de que los calamares gigantes están asociados a las mayores corrientes oceánicas, que aproximarían ejemplares muertos o moribundos a zonas costeras donde son avistados.

Se cuenta sólo con registros de capturas accidentales en distintas pesquerías, avistamientos esporádicos de animales flotando en superficie, varamientos en las costas —normalmente hallados por casualidad— o restos encontrados en el estómago de sus principales depredadores. Estos datos, amén de fraccionarios, no ofrecen fiabilidad suficiente para definir con precisión la biogeografía de *Architeuthis*.

Océano Atlántico

El número total de registros de *Architeuthis* de los que se tiene constancia es de 344. Se reparten de forma desigual: 148 en el Atlántico noroeste, 150 en el Atlántico nororiental, 6 en el Atlántico sudoeste y 40 en la región sudoriental.

Por razones desconocidas, probablemente relacionadas con cambios oceanográficos, docenas de calamares gigantes aparecieron varados o flotando en superficie en aguas de Terranova durante los años setenta del siglo XIX. Entre 50 y 60 de esos ejemplares fueron recolectados por buques pesqueros y usados como cebo para el bacalao. Se recogieron de las rocas y playas otros 23 ejemplares, que aparecieron sobre todo en otoño e invierno. Se observó una clara desproporción a favor de las hembras. Esas capturas y avistamientos se detuvieron de forma brusca a partir de finales del siglo XIX, para recuperar la frecuencia entre 1952 y 1977.

Con todos esos datos históricos, Frederick Aldrich sugirió que el principal factor responsable de esos acontecimientos eran las fluctuaciones que cada noventa años experimentaba la corriente fría de El Labrador. Cuando una rama de agua de esa corriente ("Avalon Branch") chocaba con las tierras septentrionales de Terranova, los calamares gigantes se acercaban a las proximidades de la costa siguiendo la masa de agua fría. Allí, en contacto con el influjo de aguas templadas de la corriente del Golfo, habrían encontrado la muerte. Aldrich predijo que el siguiente período en que los varamientos de *Architeuthis* volverían a ser frecuentes ocurriría alrededor de los años sesenta.

Tenía razón: entre 1961 y 1968 se hallaron nueve ejemplares de hembras inmaduras varadas en las costas del Labrador. Si las predicciones de Aldrich son correctas, la próxima aparición de calamares gigantes en esas costas debería ocurrir alrededor de 2050. Sin embargo, en diciembre de 2004, separados por un período de 17 días, se encontraron los cadáveres de un macho y una hembra flotando en superficie en dos ensenadas de la costa occidental de Terranova; el hallazgo se relacionó con las exploraciones sísmicas realizadas tres meses antes en la cuenca de Orphan.

Los registros en el Atlántico nororiental se elevan a un total de 150. La mayoría de los animales registrados en Noruega (27) corresponden al período comprendido entre 1874 y 1977, siendo casi nulos los avistamientos posteriores. Tan drástica reducción no puede explicarse por una disminución del esfuerzo de observación. Lo mismo que el episo-

MANUEL UHIA LIMA

dio de Terranova, parece guardar relación con acontecimientos oceanográficos. Podría ser resultado de una intensificación del flujo de agua tropical procedente de la corriente del Golfo, que incrementó la intensidad y la zona de influencia de las corrientes cálidas de Irminger y Noruega.

Como demostraron Ole Brix y sus colaboradores en 1989, la capacidad de transporte de oxígeno de la hemocianina (pigmento respiratorio de la sangre de los cefalópodos), baja de por sí en esos moluscos, es menor en *Architeuthis* que en otros cefalópodos pelágicos muy activos. Por otra parte, se demostró también que la afinidad de la hemocianina por el oxígeno era cuatro veces inferior cuando la temperatura aumenta de 6 a 15 ºC.

De los datos se desprende que los calamares gigantes pueden asfixiarse por desaturación de la sangre arterial cuando la temperatura ambiente aumenta ligeramente. Por eso se han hallado, en su mayoría, flotando moribundos en la superficie del océano o varados en las costas de Terranova y Noruega, donde la temperatura de las masas de agua fría pudo aumentar por efecto de una mayor influencia de masas de aguas calientes de origen tropical.

Varios factores explican el gran número de registros correspondientes a las aguas asturianas (49), en el norte de la península Ibérica, desde 1952. Por una parte, la presencia de tres cañones submarinos que cortan la plataforma continental aproximándose a la línea de costa. Por otra, una elevada producción primaria debida a afloramientos locales estacionales. En tercer lugar, el aumento del esfuerzo de pesca en los últimos años en caladeros próximos a donde medra *Architeuthis*, de tal forma que la mayoría de los animales aparecidos varados o flotando en superficie pueden atribuirse a capturas accidentales. En cuarto término, el gran esfuerzo realizado para recoger el mayor número de registros posible. Por último, la aparición masiva de cadáveres, coincidiendo en el tiempo y el espacio con las prospecciones sísmicas realizadas en los otoños de 2001 y 2003, donde se emplearon ondas acústicas producidas por cañones de aire comprimido y ecosondas de distintas potencias y frecuencias [*véase* "Calamares gigantes varados. Víctimas de exploraciones acústicas", por A. Guerra, A. F. González, F. Rocha y J. Gracia M. Vecchione, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 2004].

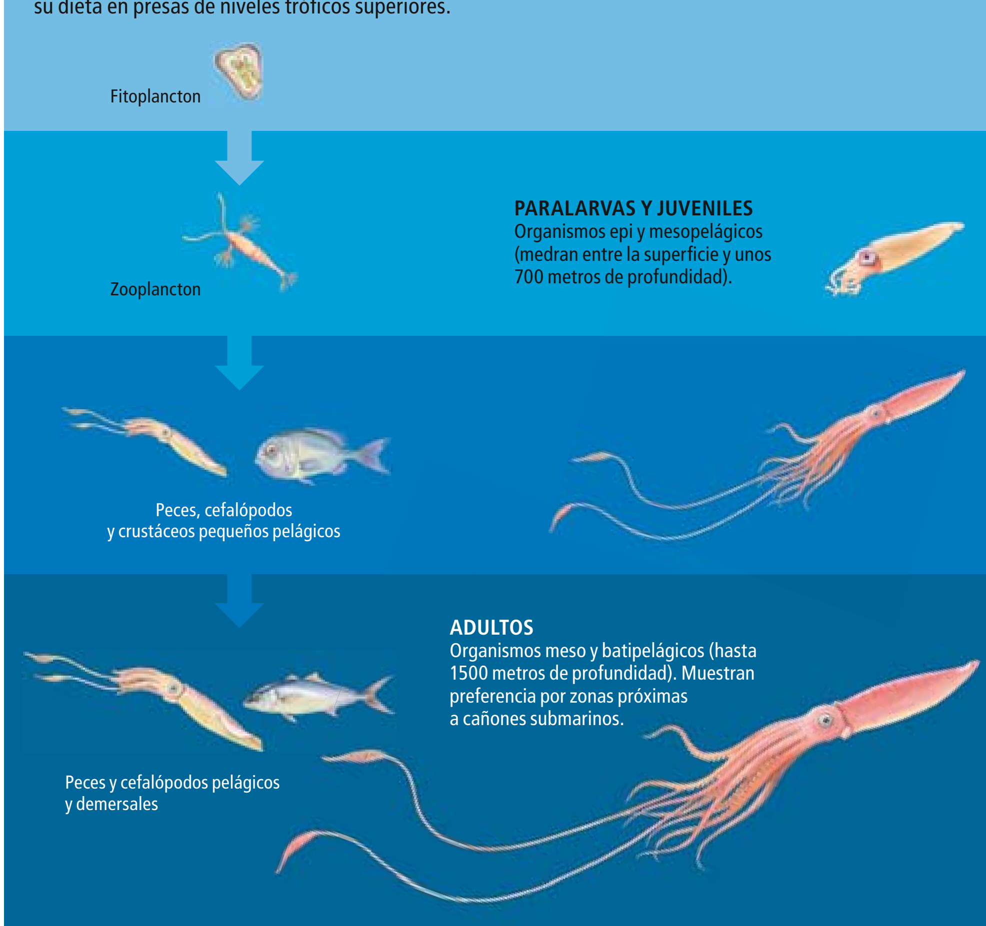
Al igual que en Terranova, se observa también en las costas asturianas una desproporción favorable a las hembras (47:2). Se desconocen las causas de tal desequilibrio en la proporción sexual. Podría interpretarse como una predominancia de las hembras en las poblaciones, lo cual no es frecuente en la naturaleza. También podría reflejar una mayor vulnerabilidad de las hembras, quizá relacionada con una segregación espacial de ambos sexos. Por otra parte, la mayor frecuencia de registros durante el otoño sugiere la existencia de algún acontecimiento atmosférico-oceánico estacional, que pudiera dar explicación sobre la mayor preponderancia de las hembras.

La maduración sexual demanda más recursos somáticos y energéticos en las hembras que en los machos. Ellas presentan mayores índices de condición (indicadores de salud); ellos se muestran más vulnerables ante las situaciones de estrés. Una explicación que parece satisfactoria en el caso de los calamares gigantes hallados en Terranova, donde la mayoría de las hembras se encontraban en avanzado estado de maduración sexual. Sin embargo, no resuelve el caso asturiano, donde la mayoría de las hembras eran sexualmente inmaduras o se hallaban en fase de maduración.

El número restringido de registros en el Atlántico sudoeste podría deberse a un sesgo de muestreo (algunos ejemplares no se avistan porque aparecen en zonas deshabitadas y otros se avistan pero no se declaran). Sin embargo, resulta sorprendente tal escasez de registros en una área geográfica con intensa actividad pesquera; sobre todo, la plataforma Patagó-

HABITAT Y DIETA

Conforme crece, *Architeuthis* experimenta cambios en su hábitat y dieta. Se produce un descenso ontogénico gradual hacia aguas más profundas en el transcurso de su vida. En las primeras fases del ciclo biológico se alimenta de organismos de la base de la red trófica; en la fase adulta, funda su dieta en presas de niveles tróficos superiores.



MANUEL UHIA LIMA

nica y alrededor de las islas Malvinas. Esta carencia podría deberse a la inexistencia de cañones submarinos, un factor importante para asegurar la presencia de calamares gigantes.

De los 40 registros procedentes del Atlántico Sudoriental, la mayoría corresponden a las aguas de Namibia y Sudáfrica. Sin embargo, el número de registros certificados por ambos países infravalora la realidad, puesto que, como nos han comunicado varios expertos sudafricanos, son numerosos los avisos que se reciben y no pueden atenderse por falta de medios, y mayor todavía el número de casos en que las capturas, los varamientos o los avistamientos no se declaran. Al igual que en Terranova y Asturias, en estas aguas africanas operan mecanismos de fertilización muy característicos, relacionados con la corriente de Benguela, que las hacen muy productivas. De ahí que sustenten importantes pesquerías comerciales.

Mediterráneo

En su revisión de la fauna teutológica realizada en 1988, Katharina Mangold y Sigurd von Boletzky, del Laboratorio Arago en Banyuls-Sur-Mer, señalaban que, con alguna excepción, todos los cefalópodos que se encontraban en el Mediterráneo se hallaban también en el Atlántico oriental. Parece que se habría producido una invasión de especies desde el océano hacia el mar, más que en sentido opuesto.

Hasta principios de 1998 no había registros de *Architeuthis* en el Mediterráneo. En la actualidad, ascienden a tres. El primero corresponde a una hembra inmadura de 125 centímetros de longitud de manto (LM); apareció muerta, fresca y varada en una playa próxima a Fuengirola. El segundo ejemplar, otra hembra inmadura, de 128 centímetros de LM, fue hallado en las mismas condiciones y playa en junio de 2001.

La hipótesis más plausible para explicar la presencia de ambos cadáveres a unos cien kilómetros del estrecho de Gibraltar es que, procedentes del Atlántico, fueran arrastrados por la corriente superficial oceánica que penetra en el Mediterráneo. Sin embargo, la captura de un macho maduro de 47 kilogramos por un arrastrero con base en Gandía en julio de 2005 a unos 450 metros de profundidad cuestiona esta hipótesis.

Según informaciones recientes, los grandes barcos de arrastre del Levante español están pescando cada vez a mayor profundidad en busca de recursos alternativos. Algunos de ellos largan sus redes en fondos de hasta 1000 metros de profundidad, caladeros que nunca antes habían sido visitados. Cabe plantearse, por tanto, que *Architeuthis* habitase en el Mediterráneo occidental pero que no se hubiese detectado hasta fecha reciente, cuando los pesqueros han incrementado su rango batimétrico de actuación hasta zonas que comprenden el hábitat natural de estos gigantes marinos.

El Pacífico

Como ocurre en el océano Atlántico, los registros de *Architeuthis* en el Pacífico se reparten de forma desigual: 30 en el Pacífico noroeste, 43 en el Pacífico nordeste, 183 en el Pacífico suroeste, y, finalmente, 10 en el Pacífico sudeste.

Las apariciones en el Pacífico noroeste se centran sobre todo entre invierno y verano en aguas japonesas. Los registros han aumentado desde 1950, probablemente debido a la existencia de mejores datos y a la presencia de especialistas. De los 30 registros conocidos en toda el área, la mayoría (30 %) corresponde a restos encontrados en el estómago de depredadores, sobre todo cachalotes, zífidos, grandes elasmobranquios (tiburones) y teleósteos (pez espada); otros registros (27 %) proceden de varazones en la costa.

Esa región del Pacífico está controlada por el sistema de corrientes del Japón, donde la de Kuroshio, una corriente cálida, estrecha y rápida que fluye hacia el noroeste a todo lo largo de la costa oriental japonesa, es la principal. Contraria a ésta, fluye la corriente fría de Oyashio. Es muy probable que la aparición de estos ejemplares en estas aguas esté asociada a cañones submarinos donde las masas de agua fría y el abundante alimento les facilitarían un hábitat adecuado. En una de esas zonas, Tsunemi Kuboreda ha capturado y fotografiado dos *Architeuthis* vivos.

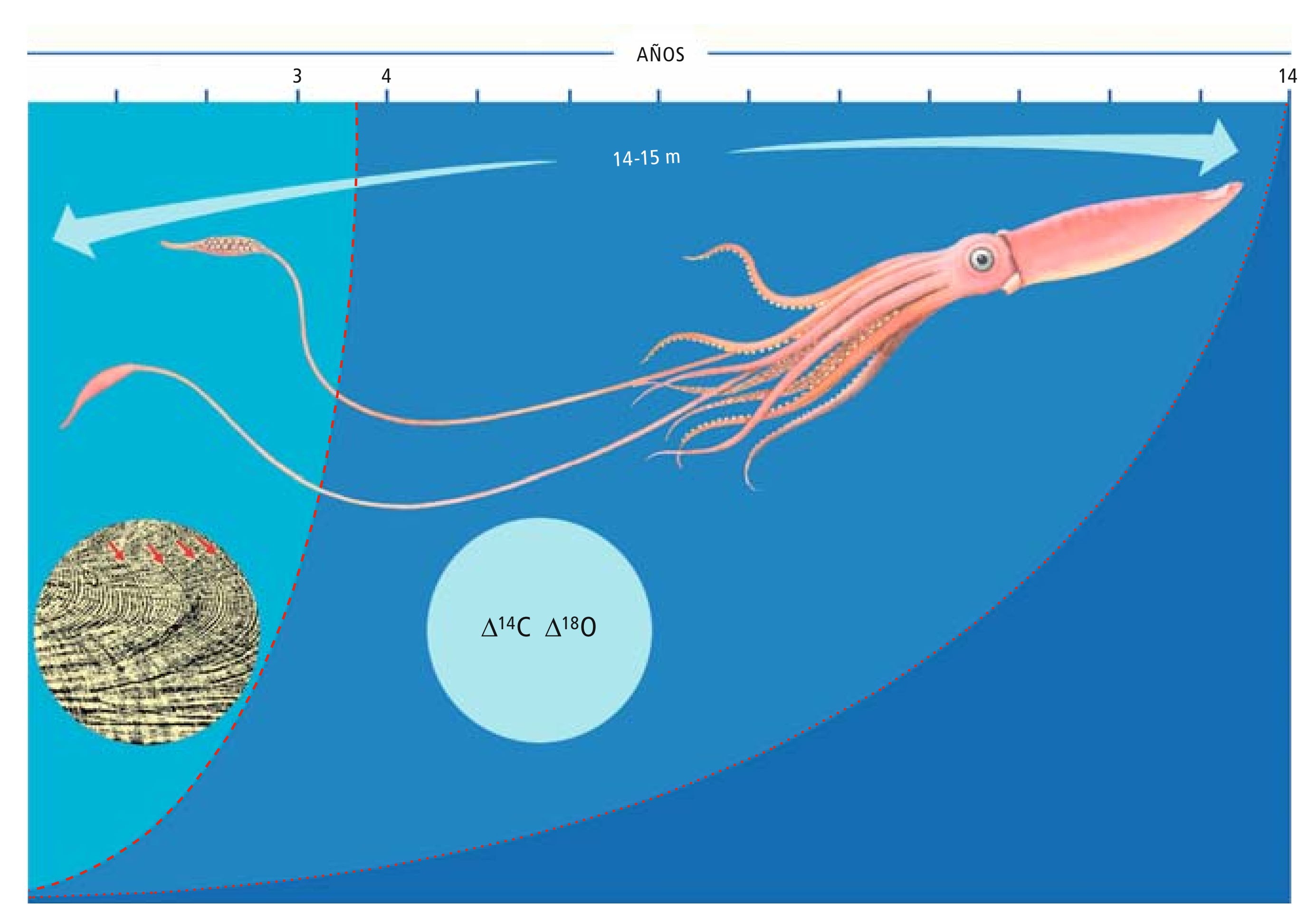
En el Pacífico nordeste se han registrado 43 ejemplares, la mayoría frente a las costas de California (44 %) y en la zona oceánica del Pacífico (44 %). Existen registros a partir de 1900, pero es después de 1950 cuando éstos aumentaron de forma notable. Se ha registrado *Architeuthis* durante todo el año, con una mayor incidencia en primavera (49 %). Las apariciones de calamares gigantes en esos puntos corresponden sobre todo a capturas con artes de pesca (56 %) y a registros de presencia en la dieta de sus depredadores (33 %).

La mayoría de *Architeuthis* registrados en las productivas aguas de California se hallaron en los contenidos gástricos de varios tipos de depredadores, que pudieron haber ingerido esas presas lejos de la zona donde fueron capturados. Por el contrario, la mayoría de los ejemplares capturados con redes lo fueron en océano abierto. Ello quizás indique que *Architeuthis* se mantiene alejado de la costa, acercándose sólo de forma ocasional a ella cuando las condiciones se lo permiten. (Las aguas cálidas de la corriente de California no constituyen ninguna barrera.)

En el hemisferio sur, la zona suroeste del Pacífico es la que presenta el mayor número de apariciones de *Architeuthis*: al menos 183 ejemplares y registros que se remontan a la segunda mitad del siglo XIX. Pese a ello, la mayoría de los registros corresponden al período comprendido desde los años cincuenta hasta la fecha (51 %). Las costas de Nueva Zelanda registran la mayoría de las apariciones de la especie (57 %), seguidas por Tasmania (34 %) y, por fin, las costas de Australia (8 %).

Aunque se encuentran ejemplares durante todo el año, la mayor incidencia ocurre en otoño (39 %), siendo las capturas con redes (56 %) y la presencia en la dieta de sus depredadores (33 %) las principales fuentes de registros en la zona. Especial mención merecen las fosas de Tonga y Kermadec, al nordeste de Nueva Zelanda. En tales zonas, altamente productivas y con presencia de cañones submarinos (Kaikoura), se produce una gran cantidad de registros de *Architeuthis*. Allí, lo mismo que en los cañones de Avilés, Lastres y Llanes en Asturias, se han realizado los intentos más serios de localización y filmación de calamares gigantes vivos.

En el Pacífico sudeste, sin embargo, sólo se registraron 10 ejemplares entre 1950 y 2008: dos aparecidos en la costa de Chile y ocho capturados en aguas oceánicas. Esta zona presenta una larga fosa submarina con profundidades de más de 8000 metros, que bordea toda la costa de Sudamérica. Su rasgo más característico corresponde a la corriente fría de Humboldt, que fluye hacia el norte a lo largo de la costa occiden-



3 . LA EDAD Y LA TASA DE CRECIMIENTO de *Architeuthis* son objeto de controversia. Según la lectura de incrementos de crecimiento diario en los estatolitos (*flechas rojas*) podría alcanzar entre 3 y 4 años de longevidad, siguiendo un modelo exponencial (*línea discontinua*). Sin embargo, los isótopos de carbono y oxígeno sugieren una esperanza de vida de 14 años (*línea de puntos*).

MANUEL UHIA LIMA

tal sudamericana. Ocasionalmente, esta corriente es reemplazada por una masa de agua cálida procedente del Pacífico central producida por el fenómeno de El Niño.

A lo largo de casi toda la costa americana habita una especie de pota de gran tamaño (*Dosidicus gigas*). Esta especie puede alcanzar hasta 2 metros de longitud; recibe la denominación local de "calamar gigante". Al margen de que *D. gigas* sustente una importante pesquería, es frecuente encontrar ejemplares varados en la costa. Distinguir entre ejemplares de esta especie y de *Architeuthis*, sobre todo si se trata de juveniles, entraña cierta dificultad para los lugareños.

Con todo, quizá la ausencia de registros en esa extensa área se deba al efecto de barrera térmica (ya sea de aguas frías o calientes) que ejerce la corriente de Humboldt, que impediría la aproximación a la costa de los calamares gigantes.

El Indico

El número de citas de calamar gigante en el océano Indico es limitado: 33 registros. La mayoría (94 %) proviene de datos de restos hallados en la dieta de grandes depredadores. Aunque tal escasez podría indicar que la población de calamar gigante en el Indico es reducida, no puede olvidarse que las condiciones hidrográficas reinantes en la región son desfavorables para el desplazamiento de los especímenes hacia la costa.

Del análisis de esos pocos registros se deducen varios aspectos de interés. En primer lugar, todos se han producido en la zona sur del Indico. Ello podría deberse a las características de las aguas septentrionales, más cálidas; a la escasa existencia de cañones submarinos en la zona norte; a la ausencia de especialistas en cefalópodos en los países del área; al tipo de pesquerías, artesanales y costeras; y, por fin, al escaso interés local en la publicación de ese tipo de hallazgos.

En segundo lugar, muchos de los especímenes de calamar gigante se han encontrado en aguas más asociadas al océano Antártico que al Indico. Los registros correspondientes a ejemplares en contenidos gástricos de depredadores se hallaron en estómagos de cachalotes recolectados en Durban (Sudáfrica) o en los del tiburón dormilón, una especie de profundidad que medra en las aguas de las islas Kerguelen, en el Frente Polar. En ambos casos, al tratarse de restos estomacales y hallarse cerca del límite del océano Indico, no puede descartarse que los ejemplares hubieran sido ingeridos en sus zonas adyacentes.

Se han identificado al menos cinco ejemplares de *Architeuthis* varados o flotando alrededor de las islas Reunión, Mauricio y Amsterdam, cuyas aguas se consideran tropicales o subtropicales. Podríamos pensar que tal observación contradice la afirmación anterior sobre la preferencia del calamar gigante por las aguas frías. Pero lo que ocurre es que esta especie habita en las profundidades, donde circula agua fría procedente de la Antártida. En estas mismas aguas medra el calamar colosal *Mesonychoteuthis hamiltoni*.

Areas sin calamar gigante

Architeuthis está ausente en las aguas polares y entre los trópicos de Cáncer y Capricornio. En el ecuador y los trópicos, los registros son demasiado escasos para sugerir la presencia de *Architeuthis* (los ejemplares registrados probablemente provengan de las zonas adyacentes, con aguas más templadas). Los tentáculos de *Architeuthis* hallados por investigadores rusos flotando en superficie en las proximidades del golfo de Guinea y el archipiélago de Cabo Verde podrían haber sido transportados por corrientes favorables desde zonas limítrofes. Por otra parte, los 5 o 6 ejemplares de *Architeuthis* poco digeridos hallados en estómagos de tiburón azul y cachalotes capturados en las proximidades de Cabo Verde podrían haber sido capturados en aguas templadas.

La presencia de *Architeuthis* en aguas de Brasil y de Bahamas, así como los ejemplares encontrados varados o flotando en aguas tropicales y subtropicales del Indico, podrían haber llegado allí procedentes de otras zonas más favorables y profundas. La circulación de agua fría en todos los fondos oceánicos permitiría a estos ejemplares sobrevivir en zonas donde las aguas superficiales son cálidas y anóxicas. Otra posibilidad es que la presencia de animales vivos guarde relación con aguas frías subsuperficiales, más que con individuos que atraviesan la frontera de los trópicos y zonas templadas.

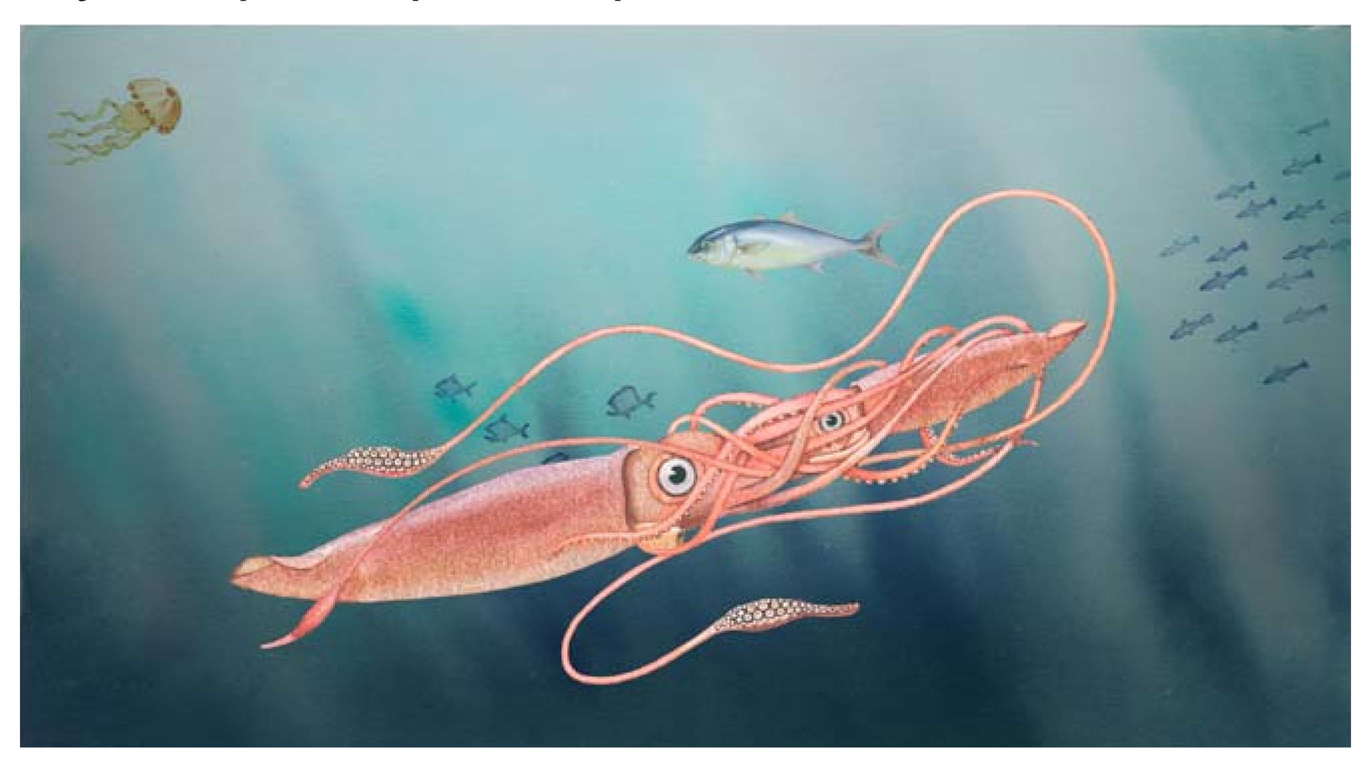
En resumen, si bien *Architeuthis* es cosmopolita, los registros se concentran en seis zonas oceánicas: alrededor de las costas de Terranova, en el norte de la península Ibérica, en aguas de Namibia y Sudáfrica, alrededor de las costas de Japón, en las costas noroccidentales de Norteamérica y en la zona que comprende Nueva Zelanda y las aguas australianas. Ello se debe a la presencia de cañones submarinos en la plataforma continental o próximos a ella, a una productividad elevada, a las corrientes marinas de agua fría, a la presencia de grandes depredadores, a la acción de ensenadas o bahías que retienen los cadáveres, y a la proximidad de áreas costeras habitadas, que permiten detectar y atender a los ejemplares encontrados.

Edad y crecimiento

La edad y las tasas de crecimiento se han estimado sólo en seis ejemplares de *Architeuthis*: tres machos maduros con tallas comprendidas entre 97,5 y 108 centímetros de LM, capturados en Irlanda en 1998, y tres hembras inmaduras de 42, 103 y 161 centímetros de LM capturadas en Australia, Asturias y Nueva Zelanda, respectivamente. Los estudios se realizaron a partir del análisis de las bandas de deposición o incrementos de crecimiento de sus estatolitos (concreciones calcáreas).

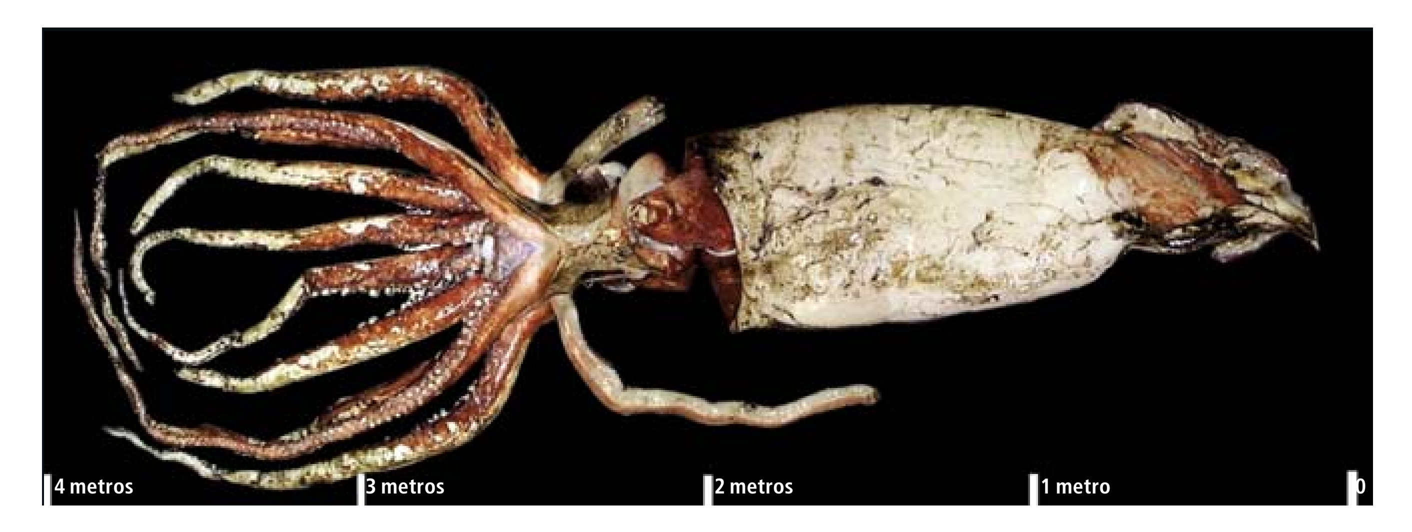
Las secciones de esas estructuras guardan semejanza, en anchura de los incrementos y orientación, con las de otros calamares de menor tamaño. Si, como acontece en otros cefalópodos, la deposición de esos incrementos es diaria, su esperanza de vida no sobrepasaría los dos años; su tasa de crecimiento variaría entre 2,60 y 4,68 milímetros de LM al día para un macho y para una hembra, respectivamente. Estaríamos hablando de una de las mayores tasas de crecimiento en el ámbito marino.

Sin embargo, N. H. Landman, del Museo de Historia natural de Nueva York, presentó en 2004 junto con sus colaboradores un estudio etario basado en el análisis isotópico de carbono y oxígeno. Los resultados, sorprendentes y contradictorios, trastocaron las teorías sobre el ciclo biológico de estos gigantes. Para una hembra cuyos incrementos de crecimiento de los estatolitos indicaban un año de edad, el análisis isotópico sugirió una edad aproximada de 14 años. (No obstante, esos resultados deben interpretarse con precaución; se asumieron demasiadas premisas sobre el cambio isotópico en la columna de agua, el rango de profundidades en el que medran estos calamares y el patrón de crecimiento de sus estatolitos.)



MANUEL UHIA LIMA

4. "CABEZA CONTRA CABEZA" parece ser la forma más probable de copulación en *Architeuthis*.



5. CALAMAR GIGANTE de más de 4 metros de largo. Los tentáculos (ausentes en este espécimen) se rompen con facilidad y pueden alcanzar los 8 metros de longitud.

Los trabajos de laboratorio y de campo sugieren para los cefalópodos un ritmo de crecimiento rápido. Sin embargo, dada la escasez de datos sobre la relación entre el tamaño, la edad y el crecimiento de *Architeuthis*, las cuestiones que atañen a la longevidad y la tasa de crecimiento de los calamares gigantes siguen abiertas. Considerando que, como hemos observado en el calamar común *Loligo vulgaris*, se infravalora el número de anillos de crecimiento en los estatolitos (las bandas más nuevas son de difícil discernimiento por su proximidad, sobre todo en ejemplares adultos), una longevidad de entre 3 y 4 años sería razonable; en cambio, los tres lustros de edad que proponen los análisis isotópicos nos parecen excesivos.

En un estudio teórico sobre el tiempo que se requeriría para alcanzar la masa corporal de un *Architeuthis* adulto, E. P. M. Grist, del centro australiano de investigación marina y atmosférica CSIRO, y G. D. Jackson, de la Universidad de Tasmania, comprobaron que el rango de valores posibles para la esperanza de vida de un calamar gigante es amplio. Concluyeron también que, según el principio de conservación de la energía, el logro de un tamaño grande requiere un crecimiento lento exponencial desde el inicio de la vida. Asimismo, macho y hembra de *Architeuthis* parecen seguir modelos de crecimiento distintos, lo que sugiere la existencia de diferencias conductuales sexuales.

Reproducción

La fecundidad de *Architeuthis* depende del tamaño de la hembra. Oscila entre 3,5 y 10 millones de ovocitos de tamaño reducido (entre 0,2 y 2,52 milímetros). Presentan un único ciclo ovárico, desovan una vez durante su corta vida y mueren después de este único desove. Dada su alta fecundidad potencial y la capacidad limitada de sus dos oviductos, lo más probable es que las hembras pongan los huevos en varias tandas a lo largo de su vida, es decir, que sean frezantes intermitentes.

Se desconoce la forma de la puesta de *Architeuthis*. Quizá las hembras dejan a merced de las corrientes una masa de huevos flotante y gelatinosa, esférica o cilíndrica, como ocurre en numerosos omastréfidos (potas) y el calamar losange *Thysanoteuthis rhombus*. Las hembras podrían también transportar la masa de huevos entre sus brazos, como se ha observado en *Gonatus onyx*. Así se explicaría el mayor tamaño de las hembras de *Architeuthis* en comparación con los machos.

A juzgar por el tamaño de los ovocitos maduros, los recién eclosionados de las especies de *Architeuthis* no superarían los 2,5 milímetros de longitud. Estas paralarvas, semejantes al adulto aunque distintas en sus proporciones corporales, forman parte del zooplancton durante algún tiempo, siendo arrastradas por las corrientes. A medida que el animal crece, aumenta su capacidad para migrar en la columna de agua y nadar, transformándose en un juvenil que adopta de forma paulatina el hábitat de los adultos.

Los machos alcanzan tallas menores que las hembras y maduran a tamaños inferiores que éstas. Como en los demás cefalópodos, los espermatozoides se empaquetan y, rodeados por membranas, dan lugar a los espermatóforos. La longitud de los espermatóforos está comprendida entre 110 y 150 milímetros.

En el Atlántico nordeste se han registrado sólo nueve machos desde 1952 hasta la fecha. Todos funcionalmente maduros; cuatro con espermatangios (espermatóforos transformados después de la cópula) embebidos por debajo de la epidermis de varios de sus brazos y en el propio manto, pero cercanos a su abertura. Se desconoce el origen de estos espermatangios. Podría tratarse de una inyección de esperma entre machos. Podría deberse también a la intromisión de un tercer macho en la cópula entre dos ejemplares de sexo distinto o a una autoinseminación accidental producida cuando un macho copula con una hembra, la explicación más plausible.

Si suponemos las pautas reproductoras de otros calamares de menor tamaño, la cópula de los calamares gigantes debería producirse con el macho situado por debajo y en posición paralela a la hembra o cabeza contra cabeza (la opción más común). Los machos de *Architeuthis* utilizan su largo y flexible pene para colocar los espermatóforos en las hembras durante la cópula, pudiendo alcanzar brazos y distintas partes del cuerpo de ésta.

Se capturaron en el sur de Australia, a entre 500 y 1000 metros de profundidad, dos hembras maduras de *Architeuthis* fecundadas. Presentaban espermatangios embebidos por debajo de la epidermis y en la capa externa de músculo de los dos brazos ventrales, así como en la parte

NASA

Los autores

Angel Guerra Sierra y **Angel F. González González** pertenecen al Instituto de Investigaciones Marinas de Vigo. Guerra es profesor de investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas; González es investigador científico de la misma institución. Ambos se dedican al estudio de los recursos naturales y la ecología marina, sobre todo en relación con los cefalópodos.

anterior de su cuerpo. La inserción de los espermatangios en el tejido podría explicarse por la morfología del pene de *Architeuthis*, que permite expulsar con gran fuerza los paquetes de esperma, inyectándolos a tal presión, que podrían producir una hendidura en la epidermis, por la cual penetrarían en la musculatura externa del manto o de los brazos. Sin embargo, no se han observado ese tipo de heridas externas en el cuerpo o brazos de las hembras.

¿Cómo entra el esperma en contacto con los ovocitos maduros para fecundarlos? De acuerdo con cierta hipótesis, la hembra usaría sus mandíbulas, o las ventosas, para desgarrar la piel sobre los espermatangios y liberarlos. Según otros, la piel de la hembra experimentaría un proceso degenerativo en los lugares de la implantación justo antes de la puesta, de modo que los espermatangios quedarían al descubierto. Por fin, otros sugieren que los espermatangios migrarían hacia la superficie de la piel bajo la influencia de enzimas proteolíticos y se desplazarían hasta el interior de la cavidad del manto cerca de la salida del oviducto; allí soltarían los espermatozoides para fecundar los ovocitos.

Cambios de hábitat y dieta

La información sobre paralarvas y juveniles de *Architeuthis* se reduce a 15 ejemplares: uno de 10 milímetros, aparecido en plancton de Australia, y 14 capturados en aguas templadas y superficiales de Nueva Zelanda. Asimismo, se recolectaron cerca de la costa de Chile y Madeira dos juveniles de 45 y 57 milímetros, respectivamente (ambas en el estómago del espadarte *Alepisaurux feroz*); se pescó en aguas templadas superficiales de Japón un ejemplar de 19,8 milímetros y un juvenil en aguas de la corriente del Golfo. Al parecer, las paralarvas y los juveniles del calamar gigante son epipelágicas y se transportan en superficie por corrientes cálidas, tal como sucede con otras especies de calamares y potas.

Desde hace más de dos siglos se sabe que los cefalópodos suelen acercarse a la superficie durante la noche y desaparecer luego durante el día. Estos desplazamientos verticales, a veces de varios centenares de metros, han servido para agrupar a las especies según su rango de distribución. En sus fases tempranas (paralarvas y juveniles), *Architeuthis* presenta un hábitat epipelágico y mesopelágico; los adultos medran en profundidades mesopelágicas y batipelágicas.

Un descenso ontogénico tal concuerda con las variaciones de concentración de elementos traza (fósforo y selenio) halladas en sus mandíbulas (picos). Los análisis de isótopos estables (carbono y nitrógeno) corroboran también esa hipótesis, al tiempo que revelan la existencia de un cambio en su dieta: de presas ubicadas en el nivel inferior de la red trófica a presas de niveles superiores.

La dieta de los *Architeuthis* adultos incluye otros cefalópodos pelágicos y una proporción notable de peces (jurel y gádidos en aguas de Irlanda y Asturias, y presas equivalentes en Namibia y Nueva Zelanda). El hallazgo de cigalas, pulpo blanco, moluscos bivalvos y ascidias en el estómago de *Architeuthis* sugiere que quizá se alimente en el mismo fondo o en su cercanía.

Las variaciones de la composición isotópica de carbono en el pico o mandíbulas de calamares gigantes de Asturias y Namibia manifiestan que *Architeuthis* habita sobre todo en áreas de alta productividad marina. Parecen tener un comportamiento sedentario, al menos en la etapa adulta.

Un análisis reciente de 14 elementos traza en los tejidos de *A. dux* de aguas mediterráneas y atlánticas españolas puso de manifiesto que la glándula digestiva y los corazones branquiales son los órganos con mayor concentración de plata, cadmio, cobalto, cobre, hierro, níquel, selenio, vanadio y zinc. Los músculos mostraron, a excepción del mercurio, concentraciones bajas de elementos traza. Sin embargo, presentaron la mayor de arsénico, cromo, mercurio, níquel y zinc (los músculos representan la mayor parte de la masa de calamar). En breve, el metabolismo metálico es el mismo que el hallado en otros cefalópodos de aguas neríticas.

En las hembras, la concentración de zinc aumentó en la glándula digestiva con el peso del ejemplar, lo que refleja cambios fisiológicos durante la maduración sexual. Al comparar las concentraciones de elementos traza en esos tejidos, los valores superiores de plata, cobre, mercurio y zinc en los ejemplares del Mediterráneo reflejaron distintas condiciones de exposición respecto al Atlántico. En comparación con otros calamares mesopelágicos del golfo de Vizcaya, las concentraciones de cadmio registradas en la glándula digestiva sugieren que *Architeuthis* se habría alimentado de presas más contaminadas; también podría deberse a una longevidad mayor que la de otros cefalópodos.

Esos datos, junto con la función clave que desempeña la temperatura en la variación de la tasa de crecimiento de los calamares —reflejada en sus estructuras duras como los estatolitos, el pico o la pluma—, convierten al cefalópodo en excelente bioindicador y modelo para el estudio del cambio climático global y la contaminación antropogénica en procesos fisiológicos, de reclutamiento y de variaciones de biomasa.

Bibliografía complementaria

SEX IN GIANT SQUID. M. D. Norman y C. C. Lu en *Nature*, vol. 389, págs. 683-684; 1997.

REPRODUCTIVE SYSTEM OF THE GIANT SQUID *ARCHITEUTHIS* IN SOUTHERN AFRICAN WATERS. H. J. T. Hoving, M. A. C. Roeleveld, M. R. Lipinski y Y. Melo en *Journal of Zoology*, vol. 264, págs. 153-169; 2004.

HABITAT AND AGE OF THE GIANT SQUID (*ARCHITEUTHIS SANCTIPAULI*) INFERRED FROM ISOTOPIC ANALYSES. N. H. Landman, J. K. Cochram, C. Cerrato, J. Mark, C. F. E. Roper y C. C. Lu en *Marine Biology*, vol. 144, págs. 685-691; 2004.

FIRST-EVER OBSERVATIONS OF A LIVE GIANT SQUID IN THE WILD. T. Kubodera y K. Mori en *Proceedings of the Royal Society* B, vol. 272, págs. 2583-2586; 2005.

CEPHALOPOD ECOLOGY AND FISHERIES. P. R. Boyle y P. G. Rodhouse. Blackwell Publishing; 2005.

HOW LONG WOULD IT TAKE TO BECOME A GIANT SQUID? E. P. M. Grist y G. D. Jackson en *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, vol. 17, págs. 385-399; 2007.

La función dual del sulfuro

Gas tóxico, con un olor a huevos podridos característico, el sulfuro de hidrógeno desempeña en nuestro organismo funciones esenciales. Haberlo descubierto permitirá nuevos tratamientos del infarto de miocardio y otras patologías

Rui Wang



de hidrógeno

Imagínese el lector que, al entrar en una sala de cuidados intensivos, con sus paredes adornadas con dispensadores para el lavado de manos y todas las superficies escrupulosamente limpias, sin el menor contaminante, percibiese un olor como de huevos podridos. Semejante yuxtaposición puede parecer del peor gusto, pero no es imposible que el sulfuro de hidrógeno (H_2S), o ácido sulfhídrico, el gas tóxico que es sinónimo de tal hedor, se integre en el futuro en el equipamiento de las UCI.

En los diez últimos años se ha venido descubriendo que el H_2S resulta, en realidad, esencial para diversos procesos de nuestro organismo, entre ellos, la reducción de la tensión arterial y la regulación del metabolismo. Por lo que ya se sabe, ese gas, convenientemente sujeto a nuestro servicio, podría resultar beneficioso para las víctimas de ataques cardíacos o de traumatismos, contribuyendo a mantenerlas con vida hasta que sea posible operarlas o transfundirles sangre.

Un soplo de veneno

Los efectos tóxicos del H_2S en el hombre son conocidos desde hace siglos. Constituye hoy el principal de los riesgos laborales en los pozos de petróleo o gas, así como en oleoductos, plantas de procesamiento y refinerías. Nuestro olfato detecta H_2S a concentraciones de 0,0047 partes por millón (ppm). A 500 ppm, el gas empieza a bloquear la respiración; una exposición a 800 ppm durante cinco minutos resulta letal. ¿Cómo podemos, pues, hablar, de la necesidad del H_2S para nuestra supervivencia?

Para comprender cómo llegó el organismo humano a depender de gas tan pestilente, hemos de retroceder 250 millones de años, cuando las condiciones para la vida en la Tierra eran harto duras. El Pérmico estaba dando a su fin, a la vez que tenía lugar la más devastadora extinción de todos los tiempos. En aquel entonces, las emisiones de dióxido de carbono, procedentes de colosales erupciones volcánicas en Siberia, desencadenaron una serie de transformaciones ambientales que redujeron peligrosamente la concentración de oxígeno en los mares del planeta. Según una de las principales teorías sobre la extinción del Pérmico, esa carencia de oxígeno fue, en definitiva, la responsable de la mortandad generalizada [*véase* "Impacto desde las profundidades", por Peter D. Ward; Investigación y Ciencia, diciembre de 2006].

Esa modificación de la química oceánica fue muy perniciosa para las especies marinas aerobias, que necesitan oxígeno para vivir. Las sulfobacterias, en cambio, proliferaron en esas condiciones de escasez de oxígeno. Para los moradores aerobios de los mares, el éxito de tales bacterias tornó más inhóspito todavía el medio, pues las sulfobacterias generaban grandes cantidades de sulfuro de hidrógeno. Finalmente —prosigue dicha tesis— el letal gas de los océanos se difundió hasta la atmósfera y eliminó a casi toda la flora y fauna de las tierras emergidas. A finales de la gran extinción del Pérmico había perecido en torno al 95 por ciento de las especies marinas y un 70 por ciento de las terrestres.

La importancia del H_2S en los procesos fisiológicos del hombre constituye, a buen seguro, un remanente de aquella época tan lejana. Los organismos que sobrevivieron a la catástrofe debieron de ser los que lograron tolerar el sulfuro de hidrógeno e incluso, en ciertos casos, utilizarlo en su provecho. Y los humanos hemos retenido algo de la afinidad hacia ese gas.

CONCEPTOS BASICOS

- Nuestro organismo produce ligeras cantidades de sulfuro de hidrógeno (H_2S), un gas tóxico.
- Cada vez hay más pruebas de que ejerce un efecto beneficioso en la salud del sistema cardiovascular y de otras partes del cuerpo.
- Los avances cosechados han promovido el desarrollo de posibles tratamientos con H_2S para diversos males, desde enfermedades cardíacas hasta el síndrome del colon irritable.

JAMIE CHUNG

Guiarse por el olfato

El sulfuro de hidrógeno no es el único gas nocivo que trabaja para el cuerpo humano. Hace unos 25 años, los investigadores empezaron a reunir pruebas de que el monóxido de nitrógeno (NO) es producido en concentraciones muy pequeñas por nuestro organismo, donde opera como molécula señalizadora e influye así en el comportamiento celular. En trabajos galardonados con el premio Nobel de medicina de 1998, se demostró que el monóxido de nitrógeno actuaba como vasodilatador, regulador del sistema inmunitario y transmisor de señales entre neuronas, por citar algunas funciones. Y el monóxido de carbono (CO), un gas incoloro e inodoro al que llaman "asesino silencioso", posee también efectos similares.

Después de mis estudios con CO y NO, tenía el convencimiento de que el organismo debía de producir y utilizar otros gasotransmisores. Tras concederle mucho tiempo y reflexión, me llegó la inspiración en el verano de 1998. Terminada la jornada laboral, al llegar a casa percibí un olor apestoso. Descubrí su origen: una vitrina donde se exhibían los tesoros de mis hijos. El olor procedía de un huevo cascado y podrido, uno de los muchos que mi hija mayor había pintado y decorado por Pascua para un trabajo escolar. Y se me ocurrió entonces que el gas de los huevos podridos, el sulfuro de hidrógeno, pudiera también ser producido por los órganos y tejidos de nuestro cuerpo.

Dado que mis trabajos sobre CO y NO se habían centrado en los efectos de los gases sobre el sistema cardiovascular, decidí empezar ahí la búsqueda de H_2S. Resultó ser un buen comienzo, pues una serie de experimentos revelaron una considerable actividad del gas.

Las primeras pruebas que realicé junto con mi grupo no tardaron en identificar ligeras cantidades del gas en las paredes de los vasos sanguíneos de ratas. Puesto que la fisiología de estos roedores es muy similar a la nuestra, tal descubrimiento indicaba que los vasos humanos producirían H_2S. Resultó alentador comprobarlo. Mas, para determinar la importancia del sulfuro de hidrógeno en el funcionamiento de nuestro organismo, no podíamos contentarnos con su mera presencia en las paredes vasculares.

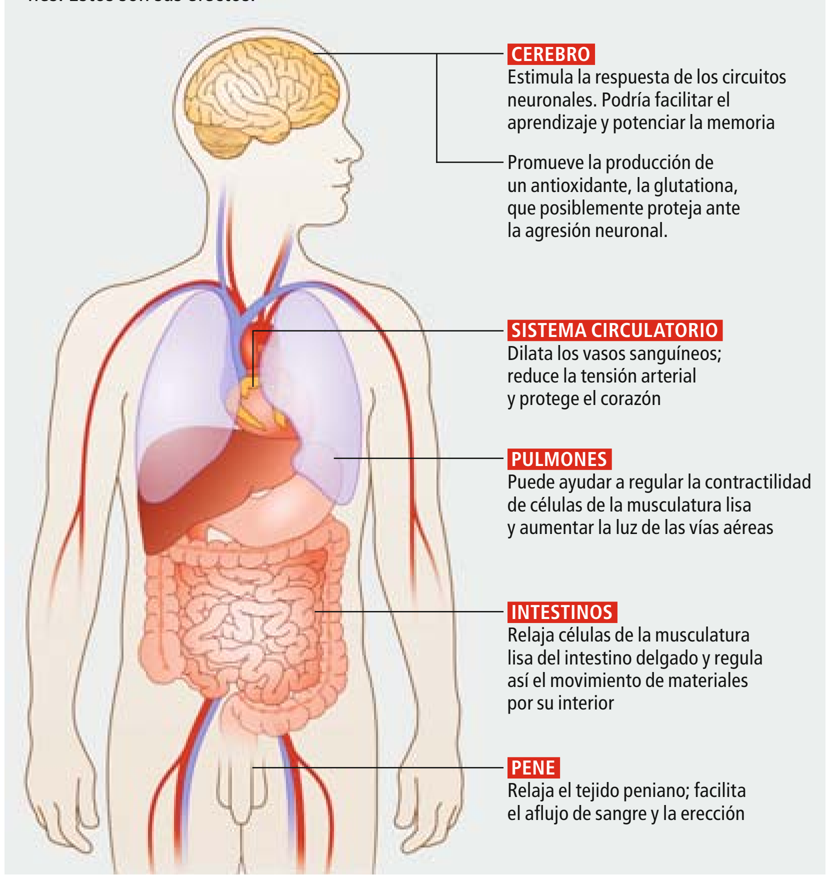
El siguiente paso fue averiguar la manera en que nuestro cuerpo produce H_2S. Optamos por examinar la enzima cistationina-gamma-liasa (CSE), que se sabía intervenía en la formación del gas en ciertas bacterias. En investigaciones anteriores se había confirmado la presencia de CSE en el hígado, donde coordina la síntesis de diversos aminoácidos que contienen azufre. (Los aminoácidos son los bloques químicos que componen las proteínas.) Pero nadie había descubierto la enzima en los vasos sanguíneos. Allí la identificó nuestro grupo, donde se combinaba con la L-cisteína y producía H_2S y otros dos compuestos, amonio y piruvato.

Una vez establecido el origen del H_2S en los vasos sanguíneos, nos dedicamos a analizar la función que el gas cumplía en ellos. Puesto que se había demostrado que el NO distendía los vasos sanguíneos, propusimos que el H_2S desempeñaría un papel similar. Los experimentos posteriores confirmaron nuestra sospecha: al empapar vasos sanguíneos de rata en una disolución de H_2S, éstos se dilataron.

Resultaba asombroso que el sulfuro de hidrógeno, al igual que el NO, regulase la tensión arterial. Pero se desconocía el mecanismo molecular de semejante regulación. Por fin, nuestra investigación sobre células tomadas de vasos sanguíneos de animales dio su fruto. Publicamos los resultados en 2001. Eran sorprendentes. Mientras que el NO provoca la dilatación de los vasos por

UN VAPOR VITAL

Pese a su toxicidad, nuestro organismo produce sulfuro de hidrógeno (H_2S), aunque en muy pequeñas cantidades. Puede contribuir a la salud de diversos modos; aquí se exponen algunos representativos. Pero no todos sus efectos son beneficiosos: el exceso de H_2S puede mermar la síntesis de insulina y, según ciertos datos, agravar las inflamaciones. Estos son sus efectos:



TAMI TOLPA

El H_2S podría servir para prevenir o tratar la hipertensión, el infarto de miocardio y el accidente cerebrovascular.

activación de la guanililciclasa, enzima que reside en células de la musculatura lisa, el H_2S induce el mismo efecto por una vía diferente. En concreto, el sulfuro de hidrógeno activa los canales K_{ATP}, proteínas que controlan el flujo de los cationes de potasio emitidos por las células de la musculatura lisa. El flujo genera una corriente eléctrica que limita el número de iones de calcio que ingresan en la célula, una restricción que relaja los músculos y dilata los vasos.

Avanzamos un paso más, de células *in vitro* al organismo entero. Inyectamos en ratas una disolución de H_2S. Observamos que su tensión arterial decaía claramente, y conjeturamos que el gas ensanchaba las arterias y facilitaba la circulación sanguínea. Ibamos acumulando pruebas de que el H_2S distendía los vasos sanguíneos y regulaba así la tensión arterial. Pero no estábamos seguros de que nuestra aportación de gas al torrente circulatorio estuviera reproduciendo lo en que verdad ocurría cuando los vasos generaban su propio H_2S.

Para determinar mejor los efectos del gas, nuestro grupo creó en 2003 una estirpe de ratones genomanipulados, privados de la enzima CSE y, por consiguiente, de la facultad de generar H_2S en los vasos. Dedicamos los cinco años siguientes, en colaboración con los equipos de Solomon Snyder, de la Universidad Johns Hopkins, y de Lingyun Wu, de la Universidad de Saskatchewan, a investigar sobre tales ratones con genes inactivados. Nuestros esfuerzos valieron la pena. En 2008 publicamos en *Science* un artículo donde detallábamos nuestros descubrimientos. Cuando los ratones modificados envejecían, sus vasos sanguíneos se contraían y padecían una hipertensión más acusada de lo normal (que medíamos mediante unos manguitos finísimos ceñidos alrededor del rabo). Al inyectar H_2S en los ratones, su tensión arterial disminuía.

El trabajo sobre los ratones genomanipulados establecía, sin lugar a ambigüedad, que el sulfuro de hidrógeno desempeñaba un papel vital en el sistema cardiovascular. Sirvió también para resolver un pertinaz misterio. Desde hacía años, después del trabajo sobre monóxido de nitrógeno merecedor de un premio Nobel, se sabía que no toda la vasodilatación era atribuible a ese gasotransmisor. Por algún motivo desconocido, en los animales cuya modificación genética impedía la producción de NO por las células endoteliales que revisten las paredes de los vasos, los vasos sanguíneos periféricos —que ni conducen al corazón ni emergen del mismo— conservaban la capacidad de distensión. ¿Qué podría provocarla, en ausencia de monóxido de nitrógeno?



BRAND X PICTURES *Getty Images (ajo)*

¿CONVIENE COMER AJOS?

Hay investigaciones que abonan la hipótesis de la capacidad del ajo para distender las paredes de los vasos, impedir o limitar la agregación de las plaquetas y rebajar la tensión arterial, con la consiguiente reducción del riesgo de ataques cardíacos, accidentes cerebrovasculares y lesiones renales. La ingesta de ajos se ha asociado también a un refuerzo del sistema inmunitario y a un menor riesgo de ciertos tipos de cáncer. Las ventajas que los ajos parecen ofrecer a la salud pudieran deberse a su relación con el H_2S. David W. Kraus, de la Universidad de Alabama, informó en 2007 que determinadas moléculas de la membrana celular de los hematíes convierten los compuestos sulfurosos de los ajos en H_2S. El ajo contiene, además, S-alil-L-cisteína, un compuesto que intensifica la producción y la circulación de H_2S en el organismo, según datos publicados ese mismo año por el grupo encabezado por Yizhun Zhu, de la Universidad Fudan en Shanghai.

El autor

Rui Wang es profesor de biología y vicepresidente de investigación en la Universidad Lakehead, de Thunder Bay en Ontario. Además de presidente de la Sociedad Canadiense de Fisiología, es un distinguido investigador en el estudio del metabolismo y las funciones fisiológicas de un grupo de pequeñas moléculas llamadas gasotransmisores, entre ellas, el monóxido de nitrógeno, el monóxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno. Wang fue galardonado por la Sociedad Canadiense de Farmacología y Terapéutica en 2008 con el Premio Pfizer para científicos senior. Avido aficionado al baloncesto, le encantan las películas de ciencia-ficción.

Nuestros estudios indican que la respuesta se halla, probablemente, en el sulfuro de hidrógeno. Aunque en un principio demostramos que la enzima CSE, asociada al H_2S, se presenta en células de la musculatura lisa, las investigaciones posteriores sobre células endoteliales obtenidas de ratones, vacas y humanos han revelado que éstas contienen CSE, e incluso en cantidades mayores que las células del músculo liso. Sigue sin estar clara la división de tareas entre el NO y el H_2S durante la dilatación, aunque algunos datos apuntan a que el NO interviene principalmente en los vasos grandes, mientras que el H_2S se concentra en los pequeños.

¿Gas terapéutico?

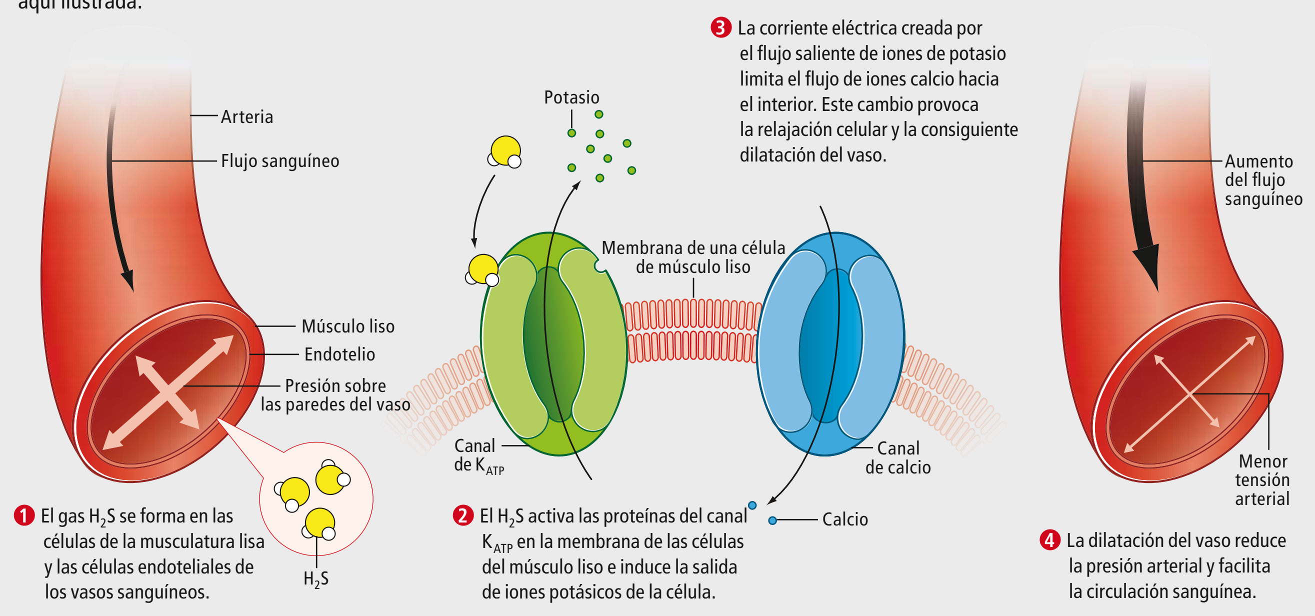
La revelación de que el H_2S se produce en el sistema cardiovascular y contribuye a la regulación de la tensión arterial captó la atención de muchos investigadores que buscaban nuevas formas de proteger el corazón ante las lesiones provocadas por la insuficiencia de oxígeno. Tal acontece cuando un coágulo impide que la sangre circule y aporte oxígeno al órgano, con la muerte consiguiente de tejido cardíaco (infarto de miocardio).

En 2006, Gary F. Baxter, hoy en la Universidad de Cardiff, y su grupo informaron sobre sus experimentos en corazones aislados de rata a los que suministraban una disolución salina para remedar el riego sanguíneo y que retiraban después para simular un ataque cardíaco. Si antes de retirar la disolución administraban H_2S, lograban reducir la gravedad de los daños en el músculo cardíaco. David Lefer, de la Universidad de Emory, demostró al año siguiente que los ratones genéticamente manipulados para que su corazón produjera más H_2S de lo normal soportaban mejor la privación de oxígeno provocada por un trombo; también eran más resistentes a las lesiones que a menudo sobrevienen al restaurar la circulación en los tejidos tras un período de privación (lesión por reperfusión).

Tales descubrimientos inducían a pensar en la posible aplicación del H_2S en el tratamiento o la prevención de la hipertensión, el ataque cardíaco y el accidente cerebrovascular. Pero las propiedades vasorrelajantes de este gas permitirían extender su uso a otros trastornos vasculares, entre ellos, la disfunción eréctil. La erección peniana se mantiene por la dilatación de ciertos vasos sanguíneos. De hecho, la Viagra actúa prolongando el efecto del NO en el pene, donde el gas dilata los vasos e incrementa así el riego sanguíneo. Según ciertos estudios, el H_2S podría ejercer el mismo efecto, aunque falta investigar su función exacta en el tejido peniano del hombre. (En el pene

GAS RELAJANTE

El sulfuro de hidrógeno desempeña un papel clave en la regulación de la tensión arterial. En estudios anteriores se había demostrado que otro gas, el monóxido de nitrógeno, relaja los vasos sanguíneos mediante la activación de la guanililciclasa, enzima localizada en las células de la musculatura lisa de los vasos. Hace poco se ha comprobado que el H_2S ejerce el mismo efecto dilatador en los vasos, si bien actúa por otra vía diferente, aquí ilustrada.



TAMI TOLPA

también se produce CO, pero este gas facilita la eyaculación, no la erección.)

El H_2S no sólo es propio del sistema cardiovascular. Se forma además en el sistema nervioso, pero en su síntesis interviene la enzima cistationina-beta-sintetasa, no la CSE. Ignoramos cómo opera el gas en el sistema nervioso. Según algunas investigaciones, se trataría de un neuromodulador que regularía la sensibilidad de los circuitos neuronales ante los estímulos. Puede que participe en un proceso de potenciación a largo plazo, que facilita la comunicación intercelular y, por ende, favorezca el aprendizaje y aumente la memoria. Se ha demostrado que este gas eleva en las neuronas las concentraciones de un antioxidante, la glutationa, lo que sugiere que las protege del estrés. Y es posible que ayude al cuerpo a sentir dolor, para que reaccione en consecuencia.

Por otra parte, parece que el gas contribuye a la regulación del metabolismo, el conjunto de procesos químicos que dirigen en el organismo el uso de energía y su síntesis. En una serie de asombrosos experimentos, el equipo encabezado por Mark B. Roth, de la Universidad de Washington, administró a ratones concentraciones ligeras de H_2S con el fin de reducir el metabolismo y retardar así la progresión de ciertas enfermedades. El ritmo cardíaco de los animales cayó de inmediato a la mitad y su estado vital quedó en suspenso; el metabolismo se ralentizó tanto, que pudieron sobrevivir con una "dieta" de sólo H_2S y oxígeno sin sufrir efectos negativos evidentes. Al parecer, durante esa "hibernación sulfhídrica" el organismo mantiene un metabolismo basal que protege de lesiones a los órganos vitales hasta que el suministro de energía retorna a valores normales. Al cabo de 30 minutos de cesar la inhalación de H_2S, los animales recuperaron su tasa metabólica normal [*véase* "Muerte aparente preventiva", por Mark B. Roth y Todd Nystul; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2005].

Está por ver si la hibernación por H_2S permitirá suspender las funciones vitales sin afectar las funciones cerebrales esenciales, como la memoria y la razón.

Si se demostrasen la seguridad y eficacia de la hibernación por H_2S en humanos, tendría un enorme valor en la medicina de urgencia. Es concebible que la inhalación de H_2S en el lugar de un accidente, o en el caso de un ataque cardíaco, pudiera conceder a los pacientes el tiempo necesario para su traslado a un hospital. Y piénsese en su uso para mantener con vida, con las constantes vitales al mínimo, a las personas que esperan el trasplante de un órgano (el gas podría prolongar la viabilidad de los órganos donados). En zonas de guerra o catástrofes naturales, la administración de H_2S amortiguaría la alta demanda de sangre para transfusiones hasta que se dispusiera de suficiente cantidad.

Roth y su grupo comunicaron en 2008 que las ratas que habían inhalado H_2S tras haber perdido el 60 por ciento de su sangre superaron el trance mucho mejor que las ratas que no habían recibido el gas: en el primer

caso, sólo sucumbió el 25 por ciento de las ratas, mientras que en el segundo lo hizo un 75 por ciento.

Optimismo, pero con cautela

Empero, no todo cuanto toca el H_2S se convierte en oro. Todavía se está deliberando si este gas alivia la inflamación o si la agrava. De acuerdo con las investigaciones desarrolladas en mi laboratorio y en otros, el sulfuro de hidrógeno constituiría un elemento clave en la diabetes de tipo 1, la forma habitual en la infancia y que obliga al enfermo a inyectarse insulina para sobrevivir. El H_2S se genera, entre otros lugares, en las células beta pancreáticas que sintetizan la insulina. En animales con diabetes de tipo 1, la formación de H_2S en esas células es anormalmente elevada, un exceso de gas que conlleva dos efectos nocivos. El primero: destruye un gran número de células beta, y disminuye así la insulina necesaria para fragmentar las moléculas de glucosa y obtener energía; el segundo: dificulta la liberación de insulina de las células beta supervivientes. En otras palabras, el H_2S puede ser responsable, en parte, de la insuficiente concentración sanguínea de insulina en los casos de diabetes de tipo 1.

Además, algunos de los efectos positivos del H_2S descritos en ratas y ratones no han podido reproducirse en mamíferos de mayor tamaño. En un estudio realizado por un grupo francés en 2007, la administración del gas a ovejas no desencadenó el estado de hibernación observado en los roedores. Y en otro trabajo, los lechones que habían recibido H_2S exhibieron un aumento de la tasa metabólica, al revés de lo esperado.

Se desconoce la repercusión de la hibernación inducida con H_2S en las funciones cerebrales. Aunque los estudios de laboratorio no hayan identificado deficiencias de tal tipo en animales tratados, hemos de ponderar la dificultad de observar tales alteraciones en animales experimentales. Está por ver si la hibernación mediante H_2S puede dejar la vida "en suspenso" y preservar, al mismo tiempo, funciones cerebrales esenciales, como la memoria o la razón.

No obstante, el gran potencial terapéutico del H_2S ha suscitado un notable interés en la industria farmacéutica. Varias son las compañías que están desarrollando productos orientados hacia una administración dosificada de H_2S. En Italia, CTG Pharma ha creado varios compuestos que son híbridos de antiinflamatorios no esteroideos (AINE) y H_2S. Los experimentos sobre animales ratifican la eficacia de los fármacos en el tratamiento de inflamaciones neuronales y gastrointestinales, la disfunción eréctil, los ataques cardíacos y alteraciones estructurales patológicas de los vasos sanguíneos. Por su parte, Ikaria, una compañía con sede en Nueva Jersey, de la que Roth es cofundador, ha acometido ya ensayos de Fase II (eficacia) de un preparado inyectable de H_2S, orientado a personas que han sufrido ataques cardíacos o que van a someterse a cirugía cardíaca o pulmonar.

Pese a la tendencia natural a evitar la exposición al H_2S, las investigaciones realizadas a lo largo de los diez últimos años, ponen de manifiesto el papel fundamental de ese gas en la salud del corazón y, posiblemente, en la del cerebro y otros órganos. Es probable que actúe también sobre otras facultades aún por identificar. Los avances esperados servirán de guía a los fisiólogos en una nueva concepción de las bases moleculares de la salud humana. Los trabajos en curso sobre el sulfuro de hidrógeno, aunque todavía en mantillas, aportarán resultados que nos habrán de llevar al tratamiento de enfermedades hasta ahora incurables.

APLICACION TERAPEUTICA DE H_2S

Se está valorando la eficacia de compuestos que contienen H_2S en el tratamiento de diversas enfermedades.

APLICACION	COMPUESTO	COMPAÑIA	FASE DE DESARROLLO
Cirugía cardíaca Infarto de miocardio Lesión renal	**IK-1001**	Ikaria	Fase II (ensayo de eficacia) Fase II (ensayo de eficacia) Fase I (ensayo de seguridad)
Inflamación intestinal	**ATB-429**	Antibes	Fase I (ensayo de seguridad)
Dolor articular agudo y crónico	**ATB-429**	Antibes	Preclínica
Síndrome del colon irritable	**ATB-429**	Antibes	Preclínica
Artritis	**ACS-15**	CTG Pharma*	Preclínica

* *El autor va a realizar ensayos de compuestos para CTG Pharma*

YO *Getty Images (velas)*; IMAGE SOURCE *Getty Images (cápsulas)*

¿UNA CLAVE PARA LA LONGEVIDAD?

Según unas primeras aproximaciones, el sulfuro de hidrógeno pudiera influir en la longevidad. Mark B. Roth, de la Universidad de Washington, y su equipo, han observado en experimentos con *Caenorhabditis elegans*, que el nematodo, criado en una atmósfera con una baja concentración del gas, vivía un 70 por ciento más que los gusanos sin tratar. Curiosamente, no parece que el H_2S actúe por ninguna de las tres vías conocidas que controlan la longevidad. No se sabe con exactitud el mecanismo de acción del gas en este caso, pero es posible que regule un gen, *sir-2*, que se ha asociado con la longevidad de gusanos y otros organismos. Los investigadores expusieron sus hallazgos en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* en 2007.

Bibliografía complementaria

TWO'S COMPANY, THREE'S A CROWD — CAN H_2S BE THE THIRD ENDOGENOUS GASEOUS TRANSMITTER? R. Wang en *FASEB Journal*, vol. 16, págs. 1792-1798; noviembre, 2002.

H_2S INDUCES A SUSPENDED ANIMATION-LIKE STATE IN MICE. E. Blackstone, M. Morrison y M. B. Roth en *Science*, vol. 308, pág. 518; 22 de abril, 2005.

H_2S AS A PHYSIOLOGICAL VASORELAXANT: HIPERTENSION IN MICE WITH DELETION OF CYSTATHIONINE GAMMA-LYASE. G. Yang et al. en *Science*, vol. 322, págs. 587-590; 24 de octubre, 2008.

PANCREATIC ISLET OVERPRODUCTION OF H_2S AND SUPPRESSED INSULIN RELEASE IN ZUCKER DIABETIC RATS. L. Wu et al. en *Laboratory Investigation*, vol. 89, págs. 59-67; enero de 2009.

CAMBIO CLIMATICO, UN EXPERIMENTO CONTROLADO

Mediante la manipulación de pastizales y bosques se estudian los efectos que los cambios en las precipitaciones, en el dióxido de carbono y en la temperatura ejercen sobre la biosfera

Stan D. Wullschleger y Maya Strahl

CONCEPTOS BASICOS

- Los investigadores están alterando la temperatura, la concentración de dióxido de carbono y las precipitaciones sobre parcelas de bosques, pastizales y cultivos para observar la reacción de las plantas.
- Temperaturas más elevadas y concentraciones de CO_2 superiores suelen producir un mayor crecimiento foliar o cosechas más abundantes, pero estos factores pueden asimismo aumentar la infestación de insectos y debilitar la resistencia de las plantas a plagas y enfermedades.
- Los futuros experimentos de campo que manejen las tres condiciones a la vez desembocarán en mejores modelos de la repercusión a largo plazo del cambio climático sobre los ecosistemas a escala mundial.

Hace treinta años, Charles F. Bases, Jr., químico del Laboratorio Nacional de Oak Ridge, del Departamento de Energía de EE.UU., escribía que la Tierra se hallaba sometida a un "experimento incontrolado" de proporciones descomunales, experimento que no tardaría en revelar las consecuencias globales del aumento de las concentraciones de gas de invernadero. Hoy sabemos que la deforestación, la roturación de nuevo suelo y la quema de combustibles fósiles están calentando el planeta. Menos seguros estamos, empero, acerca del modo en que el cambio climático alterará los bosques y los pastizales, así como los bienes y servicios que esos ecosistemas brindan a la sociedad.

Gran parte de las noticias sobre el cambio climático que aparecen en los medios no proceden de la experimentación sino de observaciones. Los científicos observan los hielos árticos, los glaciares y fenómenos naturales, como la gemación, e informan al público cuando alguno de los procesos no sigue el "calendario" habitual. El registro cronológico de esos datos reviste importancia. Sin embargo, en lugar de esperar observando el modo en que la evolución climática altera lentamente la biosfera, los biólogos especialistas en el cambio climático están llevando a cabo experimentos de campo, a menudo a gran escala, para determinar cómo reaccionarán los ecosistemas a unas precipitaciones mayores o menores, a una concentración creciente de dióxido de carbono (CO_2) y a unas temperaturas más cálidas.

Los datos experimentales son cruciales para averiguar en qué medida los ecosistemas resultarán afectados por el cambio climático en 10, 50 o 100 años, y el modo en que esas alteraciones podrían retroactuar para acelerar el cambio. Los resultados ayudarán a distinguir lo real de lo imaginado en un debate con una elevada carga emocional.

Durante años se ha estudiado la reacción de las plantas en condiciones variadas; para ello se las cultivaba durante meses en cámaras climatizadas. Si bien es necesario comprender los mecanismos que operan a esa escala, debemos investigar también las plantas en su contexto natural: los ecosistemas. En buena parte desconocidos por el público, hace más de diez años que están en curso varios experimentos al aire libre, de proporciones notables, sobre los cambios en las precipitaciones y las concentraciones de CO_2. Se han iniciado asimismo experimentos sobre la temperatura. Estas investigaciones, que se explican en los recuadros de las páginas que siguen, han arrojado ya información suficiente para mejorar los modelos que predicen los cambios en el clima y la vegetación. Se obtiene así una visión más precisa del modo en que podrían cambiar los bosques, las praderas y las cosechas en un planeta cada vez más cálido, sometido a unos regímenes de precipitaciones distintos y cubierto por más CO_2.

Continúa en la página 66

MONDOLITHIC STUDIOS



PRECIPITACIONES: EL CUANDO LO ES TODO

La cuestión: Aunque las temperaturas y los niveles de CO_2 crecerán a escala mundial, los modelos climáticos predicen que las variaciones de las precipitaciones serán más heterogéneas (distintas de un lugar a otro) en los próximos decenios.

El experimento: Se han construido diversas estructuras que reducen o aumentan la cantidad de agua que llega a las plantas en pastizales, bosques y tierras de cultivo, así como en tundras sin árboles en latitudes septentrionales. Mediante lonas abombadas o desaguaderos, se conduce el agua al exterior del lugar o se redistribuye sobre un emplazamiento cercano para comprobar los efectos de una pluviometría mayor. Esas protecciones pueden trasladarse o plegarse. Se construyen en el suelo barreras y trincheras para impedir que el agua superficial se infiltre en los terrenos estudiados y que las raíces de las plantas accedan a un agua ajena a esos terrenos.

Proyectos como el Experimento sobre Alteraciones Pluviométricas (TDE, de "Throughfall Displacement Experiment"), cerca de Oak Ridge (Tennessee), despliegan en los sotobosques unos intrincados sistemas de desaguaderos y sumideros para crear las condiciones de suelo seco o húmedo. En zonas de unos 80 metros cuadrados llegan a distribuirse hasta 1900 desaguaderos. Se utiliza un dispositivo similar en áreas con árboles regularmente espaciados, como los bosques de pinos y juníperos de Nuevo México, donde Natham McDowell, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, está estudiando el impacto de las sequías y los insectos en la mortalidad arbórea.



LOS DESAGUADEROS empleados en el Experimento sobre Alteraciones Pluviométricas para simular la sequía impiden que llegue al suelo el agua pluvial.

Los resultados: En la pradera de Konza, estudiada por la Universidad estatal de Kansas, unas plantas han tolerado mejor que otras los cambios en el régimen de precipitaciones. En un planeta en calentamiento, se desencadenaría entre las plantas una pugna por el agua.

En los bosques templados, como los que estudia Paul Hanson en su proyecto TDE, que inició hace 13 años, los árboles adultos de raíces profundas han soportado una reducción continuada de las precipitaciones. Pero han perecido numerosos árboles jóvenes y plantas de semillero de raíces someras. El experimento ha revelado también que a los árboles los dañan más unos intervalos demasiado secos durante ciertas estaciones: una pluviometría escasa durante el crecimiento del tallo a principios de la primavera retardaba el desarrollo más radicalmente que en otras épocas. Las sequías tardías provocadas después de la época de crecimiento de los árboles tenían escasas consecuencias, siempre que las reservas hídricas del suelo se repusieran antes de la subsiguiente temporada de crecimiento. En cambio, algunos árboles de gran tamaño de la pluviselva amazónica perecieron durante el cuarto año de una sequía provocada por expertos del Centro de Investigaciones de Woods Hole (Massachusetts). Sin embargo, los árboles jóvenes y los de poco diámetro resultaron menos afectados. El bloqueo del 60 por ciento del agua de lluvia hizo que se secaran los suelos profundos; los superficiales, en cambio, conservaron la humedad. Un resultado contrario al del TDE. Hasta que no se desentrañen estas complejas interacciones, no podremos desarrollar modelos que expliquen los efectos del cambio climático.

EXPERIMENTO SOBRE ALTERACIONES PLUVIOMETRICAS



CORTESIA DEL LABORATORIO NACIONAL DE OAK RIDGE (*fotografía*); DAVID FIERSTEIN (*ilustración*)

CO_2: LAS HAY QUE CRECEN MAS

La cuestión: Se calcula que los ecosistemas terrestres y marítimos absorben al menos la mitad del CO_2 liberado por los combustibles fósiles. De ello se encargan las plantas, que emplean el gas durante la fotosíntesis para producir carbohidratos. Pero, si aumentan las concentraciones de CO_2, ¿seguirá efectuándose esa conversión? ¿Se alterarán los azúcares, los carbohidratos y los compuestos protectores de las plantas, favoreciendo o perjudicando a su vez a insectos y patógenos?

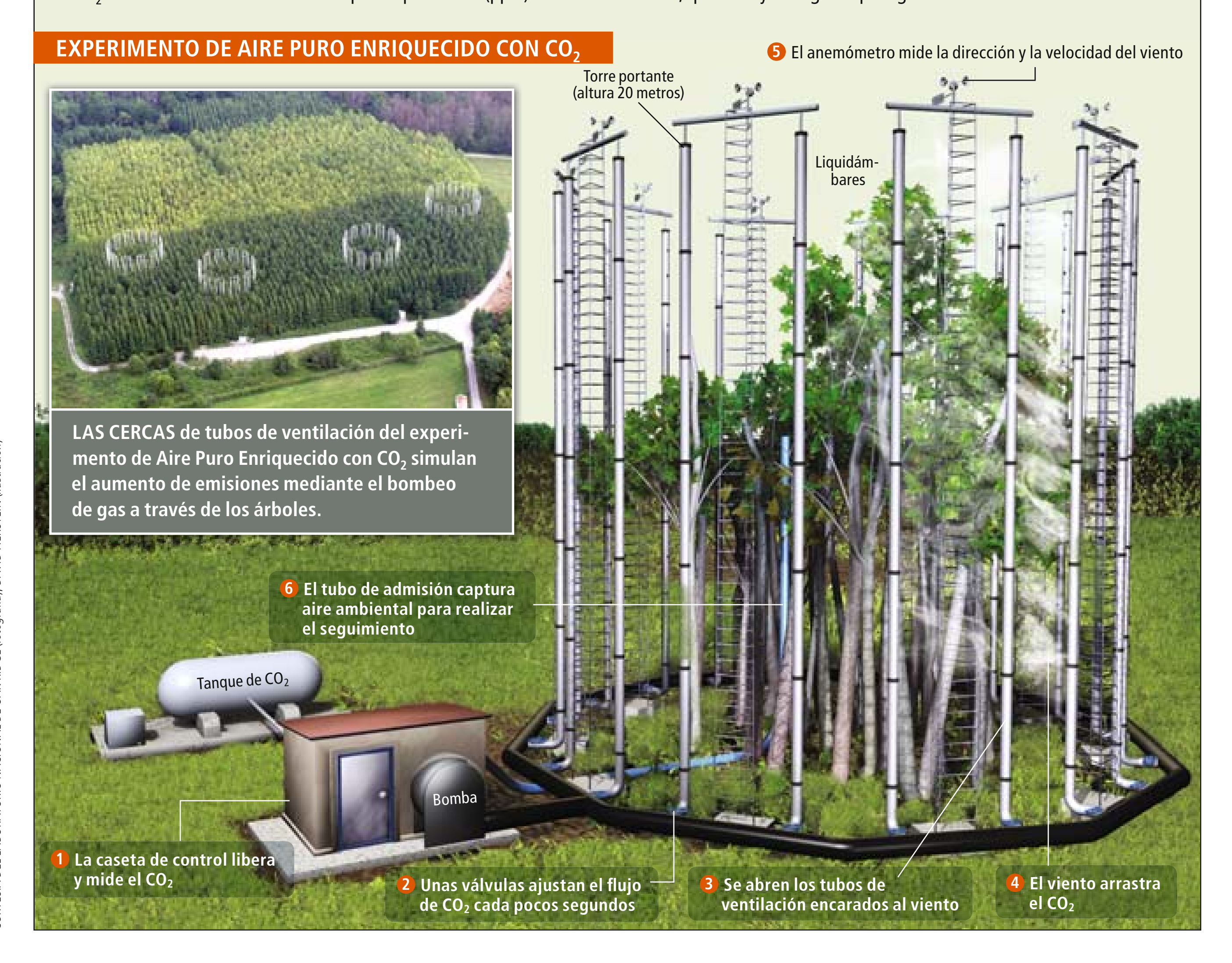
El experimento: El experimento de Aire Puro Enriquecido con CO_2 (FACE, de "Free-Air CO_2 Enrichment") lleva en curso más de un decenio en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge, bajo la dirección de Richard Norby. Se estudian cuatro áreas cercadas por tubos de ventilación. Los tubos lanzan CO_2 de tal modo que todos los árboles reciben una cantidad prefijada. Se están desarrollando experimentos FCE similares en otros 35 ecosistemas, naturales y gestionados, por todo el mundo: espacios de un metro de diámetro en pantanos, parcelas de 23 metros en terrenos de cultivo y de 30 metros en explotaciones forestales.

Los resultados: Se ha demostrado que unos niveles de CO_2 superiores estimulan la fotosíntesis, que incorpora más carbono a los tejidos vegetales. Asimismo, esta producción neta primaria (PNP) se mantiene a lo largo de múltiples estaciones de crecimiento. En experimentos realizados en bosques de Wisconsin, Carolina del Norte, Tennessee e Italia, la PNP ha aumentado en un 23 por ciento anual, cuando se incrementa el CO_2 desde el nivel ambiental de 388 partes por millón (ppm) hasta 550 ppm, nivel que podría alcanzarse dentro de 100 años si los países no hacen nada para contener las emisiones. Los resultados de modelos teóricos recientes sugieren que las plantas reaccionarán positivamente a niveles de CO_2 elevados, aunque las mejoras pudieran atenuarse si el suelo es pobre en nitrógeno y otros nutrientes.

Los aumentos de PNP son una constante en los experimentos FACE de todo el mundo. Pero el PNP indica sólo la cantidad de carbono que se añade a una planta; no refleja qué pasará con ese carbono a largo plazo. En el pinar *taeda* de Carolina del Norte, el carbono extra se almacenó sobre todo en los tallos y en las ramas, donde podría persistir durante decenios. Sin embargo, en los bosques de liquidámbares de Tennessee, el carbono aparecía sobre todo en las raíces nuevas. Esas incipientes raíces resultan beneficiosas, desde luego, pero viven sólo de unas semanas a un año; la mayor parte del carbono regresa a la atmósfera cuando los microorganismos las descomponen. Los expertos se aprestan a descubrir qué impulsa al carbono hacia uno u otro destino; sabremos más cuando, durante los próximos meses, se arranquen los árboles y se excaven los suelos en diversas parcelas.

Los experimentos FACE ya han arrojado resultados. James Anderson, de la Universidad de California en Irvine, y científicos de Oak Ridge, del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de Colorado en Boulder y otras instituciones han empleado sus datos para evaluar y mejorar el Modelo Comunitario de Sistema Climático, que simula los procesos físicos, químicos y biológicos que rigen el sistema climático de la Tierra.

EXPERIMENTO DE AIRE PURO ENRIQUECIDO CON CO_2



LAS CERCAS de tubos de ventilación del experimento de Aire Puro Enriquecido con CO_2 simulan el aumento de emisiones mediante el bombeo de gas a través de los árboles.

CORTESIA DEL LABORATORIO NACIONAL DE OAK RIDGE (*fotografía*); DAVID FIERSTEIN (*ilustración*)

TEMPERATURA: ALTIBAJOS

La cuestión: El calentamiento futuro variará con la posición geográfica. Hacia 2100, Norteamérica será de 3,8 a 5,9 ºC más cálida en invierno y de 2,8 a 3,3 ºC más cálida en verano. Los cambios afectarán al metabolismo de las plantas, la disponibilidad de agua y nutrientes en los suelos, la competitividad entre plantas y la voracidad de herbívoros, insectos y patógenos.

El experimento: Se han ensayado diversos procedimientos para caldear parcelas de tamaño limitado: lámparas infrarrojas, bandas calefactoras eléctricas en el suelo y cámaras a cielo abierto (armazones cilíndricos envueltos en plástico transparente equipados con soplantes de aire tibio). Estos métodos resultan útiles, pero presentan inconvenientes. La mayoría caldean sólo áreas circunscritas o porciones del ecosistema. Las bandas calefactoras crean en los suelos puntos calientes innaturales. Las cámaras de caldeo pasivo dependen de la hora del día y de la estación, e influyen en el régimen pluvial, el viento y la luz solar hasta el punto de complicar la interpretación de los resultados.



EN LAS CAMARAS A CIELO ABIERTO del Experimento sobre Reacción y Ajuste a la Temperatura se someten a caldeo durante todo el año árboles jóvenes y de tamaño limitado.

Los resultados: Los ecosistemas árticos y las regiones inmediatamente al sur de ellos muestran una notable vulnerabilidad a los cambios de temperatura. El Experimento Internacional sobre Tundras, dirigido por Greg Henry, de la Universidad de la Columbia Británica, hace uso de cámaras pasivas para caldear pequeñas parcelas situadas en más de una docena de emplazamientos de distintos países. Hasta la fecha, los resultados muestran que un aumento de 1 a 3 ºC favorece el crecimiento y el cubrimiento del suelo con arbustos y hierbas de hoja caduca en comparación con musgos y líquenes. Ello respalda la hipótesis de que el calentamiento provocará en los ecosistemas de altas latitudes un descenso de la biodiversidad. Un cambio de vegetación herbácea a leñosa aumentaría la energía absorbida por la tierra frente a la que devuelve por reflexión al espacio, subiendo la temperatura global.

Experimentos en otras latitudes aportan claves sobre las extinciones locales, los flujos migratorios y las alteraciones de las especies. En el Laboratorio Nacional de Oak Ridge, Carla Gunderson ha expuesto cuatro especies de árbol de hoja caduca a temperaturas de hasta 4 ºC por encima de la ambiente. Las plantas de semillero y los árboles jóvenes se adaptan fisiológicamente y muestran un mejor desarrollo la mayoría de las veces. En primavera, los árboles brotaron de 6 a 14 días antes; conservaron las hojas verdes más tiempo en otoño, alargando la estación de crecimiento hasta en tres semanas. Ciertas pruebas sugieren, no obstante, que un crecimiento primaveral adelantado podría aumentar la exposición de las plantas a una dañina helada tardía.

Pese a la utilidad de los resultados, no pueden extrapolarse a los ecosistemas los datos obtenidos en parcelas circunscritas. Hacen falta nuevos procedimientos para caldear áreas más extensas. Las técnicas han empleado sobre todo energía eléctrica, aunque para emplazamientos remotos el gas natural o la energía geotérmica podrían resultar más convenientes.

Viene de la página 62

Conclusiones a escala mundial

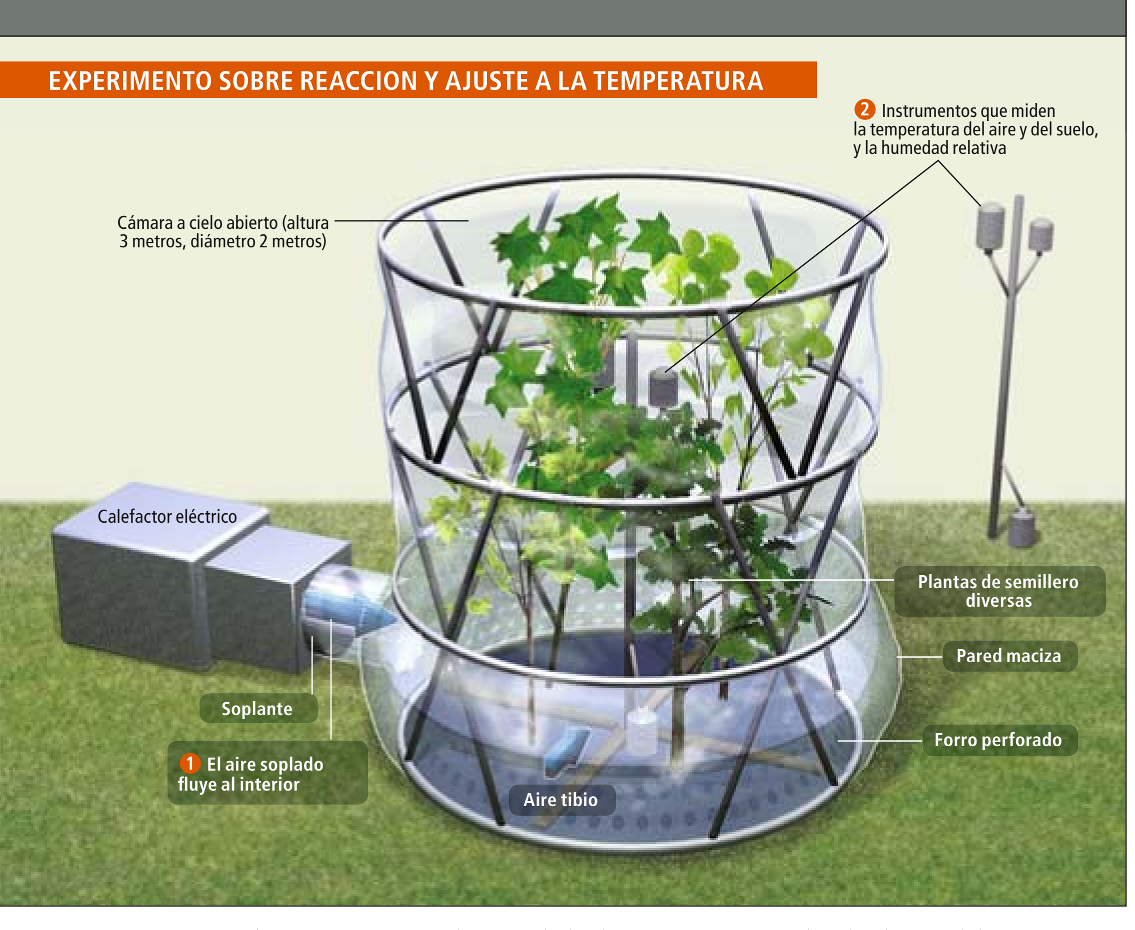
Experimentos efectuados por todo el planeta muestran que las plantas y los ecosistemas poseen una notable capacidad de adaptación a nuevas condiciones. Pero los expertos sospechan que existen unos umbrales más allá de los cuales las reacciones serán potencialmente catastróficas. Conforme nos acerquemos a esos límites, obtendremos resultados sorprendentes. Por ahora, los experimentos de campo ya han arrojado algunas conclusiones:

- Una mayor concentración de CO_2 mejora las cosechas de trigo, arroz, cebada, soja, algodón y otros productos; sin embargo, un calentamiento simultáneo, y en algunos lugares la contaminación por ozono, bien podría reducir o anular el efecto "fertilizante" del CO_2. El cambio climático alterará también las interacciones entre cosechas, malas hierbas, patógenos e insectos, pugna que con frecuencia ganarán las plagas.
- Los bosques caducifolios del este de EE.UU. son, en cierto grado, insensibles a la sequía. Los suelos profundos albergan agua abundante, que permite soportar durante todo el año el crecimiento de árboles de gran tamaño. Pero los suelos superficiales contienen poca agua y se desecan pronto, lo que causa gran mortalidad en las plantas de semillero y los árboles jóvenes.
- En una atmósfera enriquecida con CO_2, un mayor crecimiento radicular aumentará la captación de nutrientes, lo que mejoraría la productividad de los bosques en desarrollo. Un mayor crecimiento en profundidad de las raíces podría también beneficiar a las plantas de los ecosistemas áridos y de secano, de modo que aumentaría el acceso al agua del suelo.
- El calentamiento global y el aumento de las concentraciones de CO_2 propiciarían la invasión de malas hierbas como el cardo canadiense, lo que esquilmaría las cosechas o haría necesario un mayor uso de herbicidas. Las especies exóticas podrían también causar problemas. Experimentos recientes en el desierto de Mojave realizados por Stan Smith, de la Universidad de Nevada en Las Vegas, mostraron que, en un año con unas precipitaciones desusadamente altas, una concentración de CO_2 elevada estimuló la proliferación de la gramínea *Bromus tectorum*, que redujo la diversidad vegetal, modificó la cadena trófica y acrecentó el riesgo de incendios.

Los autores

Stan D. Wullschleger, biólogo especialista en cambio climático y director del Grupo de Biología de Sistemas de Plantas en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge, ha estudiado los efectos del enriquecimiento de dióxido de carbono, el calentamiento y la sequía en los bosques, plantaciones y campos añosos. En la actualidad se dedica al diseño y ensayo de técnicas de caldeo para tundras árticas y bosques boreales. **Maya Strahl**, bióloga vegetal del Laboratorio de Cold Spring Harbor en Nueva York, participó en los proyectos de investigación que el Laboratorio Nacional de Oak Ridge ofrece a los estudiantes universitarios.

CORTESIA DEL LABORATORIO NACIONAL DE OAK RIDGE (*experimento*); DAVID FIERSTEIN (*ilustración*)



LO QUE PASA CON LA SOJA

LUGAR: Instalación de Enriquecimiento de Aire Puro con CO_2, Universidad de Illinois en Urbane-Champaign
CO_2 INCREMENTADO: 550 ppm
OZONO INCREMENTADO: 1,2 veces el ambiental
PARCELAS: Círculos de 20 metros de diámetro
PREVISION: Para la mitad del siglo se prevén mayores niveles de CO_2 y ozono
RESULTADOS: Las plantas de soja crecieron más que lo normal pero el escarabajo japonés las atacó con mayor saña (*abajo*)



- Aunque la invasión, a escala mundial, de plantas leñosas en los pastizales a lo largo de las dos últimas centurias se debe sobre todo al sobrepastoreo y a la contención de incendios, la creciente concentración de CO_2 en la atmósfera podría estar contribuyendo a la invasión de árboles y arbustos en todo el oeste de EE.UU.
- Las concentraciones futuras de CO_2 afectarán a las plantas de modos que repercutirán en la salud pública: aumentará la producción de pólenes alergénicos y el desarrollo y la toxicidad de especies invasoras, como la hiedra venenosa.

Cuestiones complejas

Los experimentos al aire libre arrojan resultados reveladores. Realizados, en su mayoría, en latitudes medias de EE.UU. y Europa, deberían extenderse a otras latitudes para poder predecir con mayor precisión las reacciones de las plantas y los ecosistemas boreales, de tundra y tropicales. La preparación de esos experimentos requerirá varios años, dada su complejidad científica y su desarrollo en zonas remotas. Se necesitarán buenas dosis de ingeniería para garantizar la uniformidad de las alteraciones climáticas impuestas y la persistencia de las instalaciones.

Asimismo, los biólogos deben construir unos mecanismos que alteren no sólo los patrones de concentración de CO_2, temperatura y precipitaciones, sino también la combinación de estos tres factores. Hasta ahora sólo hemos arañado la superficie. Un nuevo experimento cercano a Cheyenne (Wyoming) está evaluando el comportamiento de las plantas en una pradera septentrional de hierba mixta frente a cambios simultáneos en la concentración de CO_2 y la temperatura. En el primer año del experimento sobre calentamiento y enriquecimiento de CO_2 de las praderas, Jack Morgan, del Servicio de Investigaciones Agrícolas del Departamento de Agricultura de EE.UU., ha hallado indicios de que el calentamiento combinado con una concentración de CO_2 superior quizás aumente la abundancia de plantas de estación cálida en las Grandes Llanuras, a expensas de las plantas de estación fría.

Se suscitan ahora cuestiones complejas. ¿Cuál es la mejor forma de manejar múltiples factores? ¿De qué modo deben considerarse, en los modelos teóricos, la combinación de estos factores y sus posibles retroacciones? Muy pronto necesitaremos datos empíricos si queremos prever, planificar y adaptarnos a un clima que no cesa de cambiar.

CORTESIA DE BRIDGET O'NEILL *Trinity College Dublin (escarabajos)*

Bibliografía complementaria

NEXT GENERATION OF ELEVATED [CO_2] EXPERIMENTS WITH CROPS: A CRITICAL INVESTMENT FOR FEEDING THE FUTURE WORLD. Elizabeth A. Ainsworth et al. en *Plant, Cell and Environment*, vol. 31, págs. 1317-1324; 2008.

CONSEQUENCES OF MORE EXTREME PRECIPITATION REGIMES FOR TERRESTRIAL ECOSYSTEMS. Alan K. Knapp et al. en *BioScience*, vol. 58, n.º 9, págs. 811-821; octubre 2008.

RISING CO_2, CLIMATE CHANGE, AND PUBLIC HEALTH: EXPLORING THE LINKS TO PLANT BIOLOGY. Lewis H. Ziska et al. en *Environmental Health Perspectives*, vol. 117, n.º 2, págs. 155-158; febrero 2009.

ENCANTADORES DE LOM

Como Charles Darwin sospechaba, las lombrices de tierra huyen de las vibraciones del suelo para escapar de topos hambrientos. Los "cazadores" de cebo saben explotar ese hábito

CONCEPTOS BASICOS

- Las vibraciones del suelo obligan a ciertas lombrices de tierra al abandono de la madriguera, para aflorar en superficie, una respuesta de la que se aprovechan los recolectores de cebo.
- Charles Darwin y otros sugirieron que las lombrices de tierra interpretaban las vibraciones como una señal del acoso de los topos. Saldrían a la superficie para evitar ser devoradas.
- Los experimentos han demostrado que Darwin estaba en lo cierto. Asimismo, han refutado la hipótesis de que las lombrices interpretan que las vibraciones se deben a la lluvia.

El lector que tenga la oportunidad de dar un paseo al amanecer por ciertas regiones de Florida, percibirá el ruido de algún depredador agazapado en la vegetación. Pensará quizás en un caimán. Pero el sonido no procede del reptil, ni de una madre osa, ni de ningún depredador introducido desde la Amazonia. Se trata de un curioso espécimen humano, el "ahuyentador de lombrices".

Los ahuyentadores de lombrices dominan el arte de obligarles a salir de sus madrigueras, para así cazarlas y venderlas como cebos. Primero, clavan en el suelo una estaca de madera; después la frotan con una placa de metal, el hierro zumbador. Las vibraciones que produce la fricción resuenan a través del suelo. En respuesta, afloran cientos de lombrices, algunas hasta a 12 metros de distancia de la estaca.

¿Por qué las lombrices salen a la superficie a plena luz del día, exponiéndose a depredadores potenciales de muy diverso tipo, incluidos los buscadores de cebo? Parece que tendría más sentido que las lombrices de tierra (plato fundamental en el menú de numerosos animales) se escondieran suelo adentro, a mayor profundidad, cuando notaran las vibraciones. Los recolectores de cebos creían que las lombrices de tierra interpretaban las vibraciones como señal de lluvia, y así se apresuraban a subir a la superficie para evitar ahogarse en un suelo inundado. Después de todo, ¿quién no ha visto alguna vez lombrices arrastrándose sobre la carretera tras una lluvia intensa?

En el siglo XIX, Charles Darwin oyó en el continente ciertos relatos sobre vibraciones que las obligaban a emerger en superficie. Y se preguntó por las causas reales de semejante comportamiento. Algunos sugerían que los gusanos interpretaban las vibraciones como señal de la presencia de topos hambrientos, por lo que se imponía la huida inmediata. En 2008, el autor resolvió el enigma. A través de varios experimentos demostré que el comportamiento de las lombrices constituía una respuesta ante la presencia de topos.

En el bosque

Darwin pensaba que la hipótesis de los topos era razonable. Así lo indicó en 1881, en su último libro (*The Formation of Vegetable Mould through the Action of Worms with Observation of Their Habits*). Pero cuando intentó engañar, mediante vibraciones, a las lombrices, tuvo poco éxito. Pronto abandonó la investigación de ese extraño comportamiento. Pero es que Darwin no pudo conocer a Gary y Audrey Revell.

Los Revell forman parte del exiguo grupo de recolectores profesionales de cebos que se ganan la vida vendiendo lombrices de tierra. Una vez al año, en abril, podemos encontrar a la pareja en el festival anual de ahuyentadores de lombrices de Sopchoppy, en el brazo territorial del noroeste de Florida (*panhandle*). El festival, que celebra la historia local, incluye música en directo, vendedores ambulantes de comida, camisetas alusivas a las lombrices y la coronación de la "reina de los ahuyentadores de lombrices".

El arte de cazar lombrices se ha transmitido durante generaciones en el sureste de Estados Unidos. Alcanzó su apogeo en el Bosque Nacional Apalachicola, en los aledaños de Sopchoppy, durante los años sesenta y setenta. Cuando la práctica empezó a atraer la atención de los medios, los agentes forestales se preocuparon por la posible sobrecaza de lombrices de la región (*Diplocardia mississippiensis*). Ahora exigen un permiso anual para cazar lombrices dentro de los límites del bosque.

Kenneth Catania

BRICES

El Bosque Nacional Apalachicola constituía el lugar perfecto para comprobar la hipótesis de los topos. Las *Diplocardia* del área son legendarias por su respuesta ante las vibraciones. Aunque numerosas especies de lombrices que se encuentran en Norteamérica son invasoras, introducidas desde Europa, las del género *Diplocardia* son nativas de la región. Ello significa que han coevolucionado con los depredadores locales. Su comportamiento refleja, pues, adaptaciones al entorno en cuestión.

El autor pidió ayuda a los Revell para observar la respuesta de las lombrices ante los ruidos. Mientras Gary se ocupaba de la estaca y el hierro, y Audrey cazaba lombrices, Catania marcaba cuidadosamente con una banderola el punto de donde salía cada lombriz. Para su sorpresa, las lombrices salieron a más de 12 metros de donde se hallaba Gary.

Observaron también el comportamiento de las lombrices, una vez en la superficie. Mediante geófonos (dispositivos para registrar las vibraciones del suelo) midieron, en distintos puntos, la frecuencia y la magnitud de las vibraciones generadas por el proceso. Las lombrices salían pronto del suelo; diríase que "corrían". El movimiento rápido e inmediato se compadecía con la huida de un peligro subterráneo; con un ritmo más pausado, los anélidos buscaban luego un nuevo lugar en donde excavar, a varios metros de distancia.

Después de arrastrarse sobre el suelo durante unos 10 minutos, las lombrices iniciaban la tarea laboriosa de excavar otra vez, empresa que podía tardar de 10 minutos a más de una hora. Lo consiguieron en su mayoría, pero algunas fueron atacadas por hormigas o devoradas por serpientes, lagartos o escarabajos carnívoros; otras, que emergieron en



1. "CAZADORA" DE CEBO, Audrey Revell.

CORTESIA DE KENNETH CATANIA

El autor

Kenneth Catania se doctoró en neurociencias por la Universidad de California en San Diego. Es profesor de la Universidad Vanderbilt. Centra sus estudios en el cerebro y los sistemas sensoriales de mamíferos insólitos, entre ellos los topos de nariz estrellada, las musarañas acuáticas y las ratas topo desnudas.

días cálidos y secos, murieron deshidratadas. Salir a la superficie tiene un coste para estos invertebrados. Deben tener una razón poderosa para hacerlo.

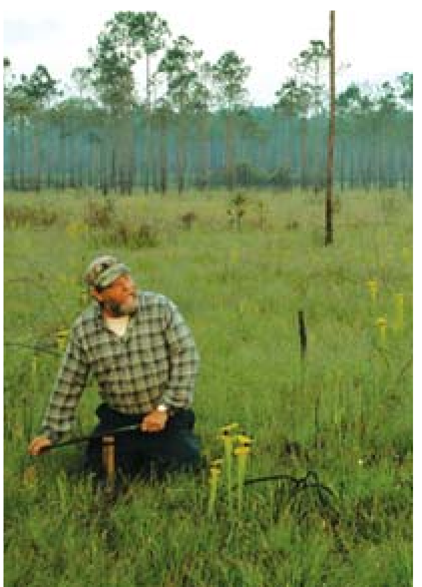
Para demostrar la conexión entre las lombrices y los topos, había que empezar por comprobar si había topos en la zona. En particular, si merodeaba por allí el topo americano oriental (*Scalopus aquaticus*), el único presente en esa región. Catania tuvo la respuesta en cuanto puso pie en el Bosque Nacional Apalachicola. Mejor dicho, ni siquiera tuvo que apearse del coche para distinguir señales de toperas (crestas de tierra elevadas) que cruzaban las pistas de tierra forestales. Tras conducir por la zona durante varios días, marcó 39 de esas toperas y capturó varios topos mientras éstos reparaban los túneles aplastados por los vehículos. El tráfico que circula diariamente por esas pistas forestales causa la compactación del suelo, lo que dificulta la excavación del mismo. Pero los topos harán todo lo posible por no abandonar su escondrijo subterráneo. Por tanto, la lombriz escapada de la madriguera, quedará a salvo de los topos que ronden por la vecindad.

Depredador encubierto

El paso siguiente consistía en medir la superposición entre el hábitat de los topos y el de las lombrices. Gary Revell informó a Catania de que los cazadores de cebo dejaban abiertos por todo el bosque los agujeros en donde habían clavado las estacas. Bastaba, pues, localizar los orificios y medir la distancia que los separaba de la topera más cercana. Con esa observación se tendría una idea de la superposición entre topos y cazadores de lombrices, y, por tanto, entre topos y lombrices. Se comprobaron ocho puntos de emisión de vibraciones. En todos había toperas. La distancia media de un agujero de estaca a una topera era de sólo 20 metros, mucho menos de lo que Catania esperaba. El Bosque Nacional Apalachicola estaba repleto de topos.

¿Cuántas lombrices constituyen la pitanza de los topos? Un topo capturado en el Bosque Nacional Apalachicola comió el equivalente de su peso corporal en *Diplocardia* (40 gramos, o unas 20 lombrices) cada día durante dos semanas. Si se le presenta la ocasión, un topo comerá anualmente hasta 15 kilogramos de lombrices, unas 7000 lombrices de buen tamaño. Las lombrices de tierra tienen, pues, una razón poderosa para evitar a toda costa a esos mamíferos insectívoros. Los datos respaldaban la idea de Darwin.

Si los ahuyentadores de lombrices remedan a los topos, es presumible que un topo produzca al excavar en el suelo vibraciones similares a las de esos cazadores. El autor no tuvo la oportunidad de observar ningún topo oriental hurgando en busca de comida en el Bosque Nacional Apalachicola. Así que decidió estudiar los topos orientales que medraban cerca de su casa, en Tennessee. Con un poco de paciencia, geófonos y un ordenador portátil, grabó a varios topos silvestres mientras excavaban en el suelo en busca de alimento. Las vibraciones de los topos (producidas sobre todo





CORTESIA DE KENNETH CATANIA

2. LOS "AHUYENTADORES DE LOMBRICES" del sureste de EE.UU., como Gary Revell (*en las fotografías*), obligan a aflorar en superficie a lombrices de la especie *Diplocardia mississippiensis*, mediante la producción de vibraciones. Para ello restriegan una placa metálica (hierro zumbador) sobre una estaca de madera (*izquierda*). El autor colocó banderolas allí donde las lombrices emergían (*derecha*), a distancias de hasta 12 metros de la estaca.

cuando sus potentes patas anteriores rompían las enmarañadas raíces vegetales) podían oírse desde varios metros de distancia. Los registros revelaron un máximo en la intensidad de las vibraciones en frecuencias que se superponían a las que emitían los ahuyentadores de lombrices (entre 80 y 200 hertz).

Lombrices a la carrera

Catania construyó lizas de un metro de ancho y las llenó de tierra. Allí podría observar, grabar en vídeo y medir las interacciones entre topos y lombrices. Pero antes de acometer los experimentos, realizó, en colaboración con los Revell, una prueba más sencilla. Tenían un balde lleno de tierra con docenas de gusanos y un topo recién capturado. Los pusieron juntos para ver qué ocurría. El topo excavó en la tierra. A los pocos segundos, empezaron a salir las lombrices.

El comportamiento de las lombrices en las lizas no resultó menos espectacular: conforme los topos excavaban túneles en varias direcciones, los anélidos surgían del suelo presos del pánico. En ese entorno, más natural, quedaba claro que las lombrices huían de un depredador temido, pues salían a la carrera (de lombriz). En otros experimentos, en lizas de menor tamaño y dotadas de altavoces, las lombrices huían también cuando se emitía en el suelo el sonido grabado de un topo en busca de comida. Los resultados lo dejan bien claro: las lombrices de tierra *Diplocardia* temen a los topos y salen a la superficie cuando notan que éstos se acercan. Y, por lo que parece, para las lombrices del Bosque Nacional Apalachicola, un ahuyentador humano suena igual que la madre de todos los topos.

¿Podrían las lombrices haber evolucionado para escapar del subsuelo cuando notan que cae la lluvia? Para someter a prueba esta hipótesis alternativa, acometí otra serie de ensayos. El más directo consistió en esperar a que se produjeran tormentas con fuertes precipitaciones y observar la respuesta de las lombrices en lizas exteriores. En tales casos, sólo dos o tres de 300 lombrices de tierra salieron a la superficie al cabo de media hora. La observación encajaba con lo indicado en otros estudios previos que hallaron una lenta respuesta de salida a la superficie tras muchas horas de permanecer en el suelo inundado. Las lombrices no abandonan su madriguera durante los primeros minutos de una tormenta, como cabría esperar si la respuesta estuviera desencadenada por las vibraciones de la lluvia y como ocurre cuando entran en acción los "gruñidores" humanos y los topos.

Al parecer, Darwin estaba en lo cierto. Los ahuyentadores de lombrices se aprovechan de lo que Richard Dawkins ha denominado "efecto del enemigo raro". En este escenario, un depredador obtiene su presa al explotar un mecanismo de defensa que suele resultar eficaz. Puesto que los topos cazan día y noche, y durante todo el año, es lógico que una lombriz de tierra huya a la superficie cuando detecta una vibración como la que produce un topo; las lombrices que no tengan suerte terminarán ensartadas en un anzuelo (o en el estómago de algún otro depredador astuto).

Nikolaas Tinbergen había ya señalado que las gaviotas reidoras "pisotean" el suelo para hacer salir a las lombrices. Más tarde, a mediados del decenio de los ochenta, John H. Kaufmann, de la Universidad de Florida, describió la manera en que las tortugas o galápagos de bosque "zapatean" sobre el suelo para obtener una pitanza fácil de lombrices. Ambos investigadores llegaron a la conclusión de que esas vibraciones remedaban las de los topos. Kaufmann, natural de Florida, sugirió que las tortugas de bosque "gruñían" para las lombrices. Pero la hipótesis nunca se había comprobado, hasta ahora.

Mientras Catania recogía su equipo, terminado el trabajo de campo en Florida, los Revell le obsequiaron con un hierro zumbador que había pertenecido a la familia durante decenios. Un gran honor. Al abandonar el bosque, detuvo su automóvil para dar de comer a un topo que había capturado aquel día. Era el momento de poner a prueba su capacidad de ahuyentar lombrices. El hierro de los Revell funcionó como un amuleto: no tardó en capturar un buen plato de comida serpenteante para topos. Ironía del destino, las lombrices habían huido de un falso topo para terminar en el estómago de uno de verdad.



3. TOPO AMERICANO ORIENTAL (*Scalopus aquaticus*). Posee patas anteriores adaptadas para la excavación. Conforme abre túneles, produce vibraciones que alertan a las lombrices *Diplocardia* de su presencia. Las lombrices intentan escapar de este depredador saliendo a la superficie. Pero a veces son otros depredadores (recolectores de cebos, tortugas de bosque o gaviotas reidoras) los que remedan las vibraciones de los topos para engañar a las lombrices y obligarlas a abandonar su escondrijo.

CORTESIA DE KENNETH CATANIA

Bibliografía complementaria

THE FORMATION OF VEGETABLE MOULD THROUGH THE ACTION OF WORMS WITH OBSERVATION OF THEIR HABITS. Charles Darwin. D. Appleton, 1882.

THE HERRING GULL'S WORLD: A STUDY OF THE SOCIAL BEHAVIOR OF BIRDS. Nikolaas Tinbergen. Basic Books, 1960.

THE WOOD TURTLE STOMP. John H. Kaufmann en *Natural History*, vol. 98, n.º 8, págs. 8-12; agosto, 1989.

WORM GRUNTING, FIDDLING, AND CHARMING — HUMANS UNKNOWINGLY MIMIC A PREDATOR TO HARVEST BAIT. Kenneth C. Catania en *PLoS ONE*, vol. 3, n.º 10, 3:e3472; 14 de octubre, 2008.



SUPERFICIES HIPERHIDROFILAS E HIPERHIDROFOBAS

La extraordinaria capacidad para repeler la suciedad que posee la planta de loto ha inspirado todo un abanico de técnicas biomiméticas de autolimpieza y bactericidas

Peter Forbes

El que posteriormente daría en llamarse "efecto loto" fue descubierto a finales de los setenta del siglo pasado por Wilhelm Barthlott, de la Universidad de Bonn. En el futuro, las aplicaciones de ese fenómeno podrían dar lugar a ciudades en las que una ligera lluvia lava completamente las paredes y ventanas de los edificios, con carpas y toldos que se mantienen libres de manchas sin necesidad de la intervención humana. En Japón, determinadas investigaciones relacionadas están dando como fruto superficies que se desinfectan y desodorizan solas, con el objetivo de emplearlas en cocinas o instalaciones sanitarias.

Michael Rubner y Robert Cohen, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), contemplan la aplicación de técnicas similares en la construcción de espejos y vidrios que no se empañan, así como para controlar los "laboratorios en microchips"; pequeñas estructuras en las que los fluidos



CONCEPTOS BASICOS

- Las rugosidades microscópicas que cubren la hoja del loto hacen que su superficie exhiba una extrema repulsión al agua, o hiperhidrofobia. Las gotas de lluvia se deslizan fácilmente por ella, arrastrando consigo la suciedad.
- Se han desarrollado materiales sintéticos autolimpios. Algunos de ellos se basan en el "efecto loto". Otros se sirven de la propiedad opuesta (hiperhidrofilia) y de reacciones de catálisis.
- Las aplicaciones venideras lograrán combinar estos dos distintos comportamientos frente al agua. También podrán conmutar a voluntad ambas propiedades en una misma sustancia, lo que serviría para controlar la circulación en sistemas microscópicos de fluidos.

circulan por canales microscópicos y cuyas funciones incluyen efectuar análisis químicos. Hay ya en el mercado blusas y pantalones que rechazan la mostaza, el vino y el café. Se avecina una revolución en el campo de las superficies autolimpias.

El primer ejemplo de materiales que se limpian a sí mismos lo proporciona la propia naturaleza. Se trata del loto sagrado (*Nelumbo nucifera*), una planta acuática perenne y que tradicionalmente ha desempeñado en varias religiones y culturas orientales un papel relevante. El loto es venerado por su excepcional pureza: crece en aguas fangosas, pero sus hojas emergen a varios metros del agua y rara vez están sucias. Las gotas de agua sobre las hojas del loto irradian un brillo particular, y la lluvia arrastra la suciedad de su superficie con mucha más rapidez y facilidad que en cualquier otra planta.

Esta última propiedad fue la que despertó la atención de Wilhelm Barthlott. En los años setenta se sintió atraído por las posibilidades que ofrecía el microscopio electrónico, comercializado en 1965 y con el que se lograban obtener imágenes nítidas de estructuras de escala nanométrica. Con tamaña amplificación, una simple mota de polvo puede arruinar la imagen, lo que exige limpiar cuidadosamente las muestras. Sin embargo, Barthlott reparó en que algunas plantas parecían no necesitar limpieza. Entre ellas destacaba el loto.

Barthlott descubrió que el efecto se debía a la combinación de dos propiedades de la superficie de la hoja: su textura cérea y las pequeñas protuberancias de escala micrométrica que la recubren. Sabemos que las superficies céreas son en sí hidrófobas: el agua depositada sobre ellas forma gotas que minimizan su área de contacto con el material (*véase el recuadro* "La física del loto"). Por el contrario, cuando el agua cae sobre un material hidrófilo, se extiende sobre su superficie y el área de contacto es mayor. En una superficie hidrófila, el ángulo de contacto entre el material y el líquido (en el punto en el que ambos se tocan) es, por definición, menor de 30 grados; las superficies hidrófobas exhiben un ángulo de contacto superior a los 90 grados.

Pero la hoja del loto no es simplemente hidrófila. Las innumerables protuberancias de su superficie acentúan el fenómeno y hacen que se torne "hiperhidrófoba"; es decir, el ángulo de contacto supera los 150 grados. Las gotas apenas si rozan la planta, conservan una forma casi esférica y se desplazan por ella con la facilidad de las bolas por un rodamiento. Ese gran ángulo de contacto se debe al aire situado entre los recovecos de sus prominencias; efecto que queda descrito por la ecuación de Cassie-Baxter, desarrollada por A. B. D. Cassie y S. Baxter en el decenio de los cuarenta.

Como también advirtió Barthlott, la suciedad, al igual que el agua, se deposita sólo en las crestas de las protuberancias, de suerte que las gotas de lluvia humedecen las partículas de suciedad y las arrastran consigo. No deja de ser paradójico que estos bultos microscópicos favorezcan la limpieza. Desde pequeños se nos ha enseñado que los rincones y las hendiduras son refugios de la suciedad, por lo que, para mantener limpias las cosas, habría que dejarlas lisas. Pero el loto nos demuestra que esto no es enteramente cierto.

Botánico por encima de todo, Barthlott no reparó en un principio en las posibilidades comerciales que entrañaba el efecto limpiador de la hoja del loto. En los años ochenta, sin embargo, cayó en la cuenta de que sintetizar superficies céreas y rugosas podía tener numerosas aplicaciones. Barthlott patentó la construcción de superficies con prominencias microscópicas para que fuesen autolimpias y registró Lotus Effect como marca comercial.

No es nada fácil recubrir un objeto con una película hiperhidrófoba. Un material hidrófobo es, por su propia naturaleza, repelente. Pero ha de lograrse que una superficie con esas características se adhiera al objeto que queremos recubrir. No obstante, a comienzos de los noventa, Barthlott ya había creado su "cuchara para miel": una cuchara cuya superficie de rugosidad microscópica permitía escurrir por completo la miel sin dejar nada detrás. El producto logró convencer de la viabilidad de su técnica a varias empresas químicas importantes, que pronto encontraron nuevas maneras de explotar el efecto.

Hasta ahora, su principal aplicación ha sido una pintura para fachadas, StoLotusan, comercializada en 1999 con enorme éxito por la multinacional alemana Sto AG. Lotus Effect es hoy una marca familiar en Alemania. En octubre de 2007 *Wirtschaftswoche*, semanario de economía, la incluyó entre las 50 invenciones alemanas más notables de los últimos años.

Sin manchas de comida

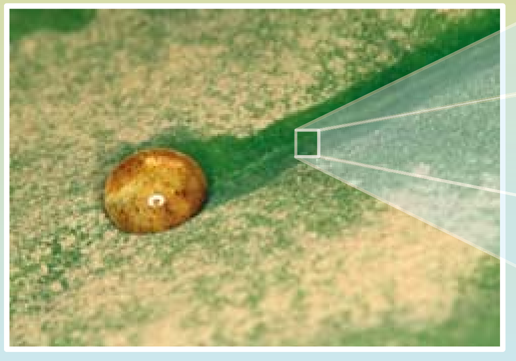
Parece natural asociar la palabra "autolimpieza" con la vestimenta. No limpiamos muy a menudo las fachadas de nuestras viviendas, pero sí la ropa que llevamos. Tras unos comienzos algo titubeantes han comenzado a aparecer los tejidos autolimpios, el primero de los cuales fue Nano-Care.

Nano-Care es un acabado que se aplica a las telas, desarrollado por el inventor David Soane y fabricado hoy por su compañía, Nano-Tex. Para visualizar el efecto de Nano-Care,

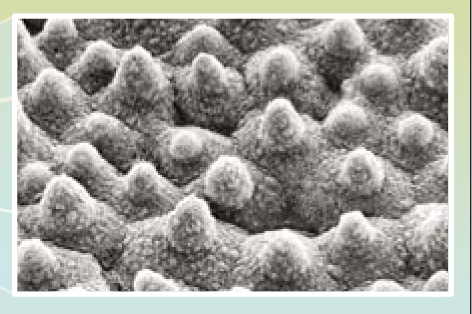
EL EFECTO LOTO

La notable capacidad de la hoja del loto para conservarse limpia ha inspirado el desarrollo de los materiales autolimpios.





▲ El agua fluye sobre la hoja sin adherirse en absoluto y arrastra consigo la suciedad.

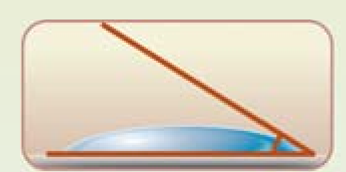


▲ La clave de la fuerte repulsión al agua se encuentra en las rugosidades de escala micrométrica que recubren toda la superficie. El efecto es aún mayor debido a un revestimiento de cristales de cera, de escala nanométrica.

LA FISICA DEL LOTO

El efecto de autolimpieza en el loto obedece a la extrema repulsión al agua (hidrofobia) de sus hojas. Las cualidades hidrófobas o hidrófilas de una sustancia dependen del ángulo de contacto entre la superficie del material y la del agua.

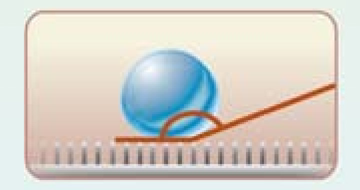
ANGULOS DE CONTACTO



SUPERFICIE HIDROFILA:
menos de 30 grados



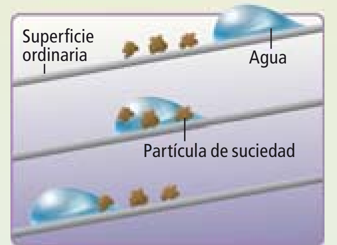
SUPERFICIE HIDROFOBA:
más de 90 grados



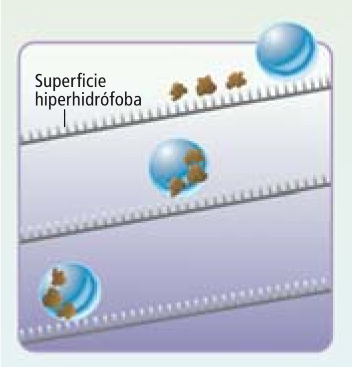
SUPERFICIE HIPERHIDROFOBA:
más de 150 grados

El gran ángulo se debe al aire que queda atrapado entre las protuberancias, que minimiza la superficie de contacto con el agua.

EL LOTO SE LIMPIA A SI MISMO



En una superficie ordinaria (no extremadamente hidrófila ni hidrófoba), la gota de agua resbala y deja la mayoría de las partículas adheridas al objeto.



Sobre una superficie hiperhidrófoba, una gota de agua se desplaza rodando, con lo que acumula la suciedad y la transporta consigo. El agua y la suciedad tienen más afinidad entre sí que cualquiera de ellas con la superficie.

imaginemos la pelusa de un melocotón bajo el agua del grifo. La "pelusa" de Nano-Care está formada por pelillos minúsculos que se adhieren a las hebras de algodón. Son tan finos (menores que una milésima parte de la altura de las protuberancias del loto) que, en comparación, las hebras de algodón parecen troncos de árboles.

Con Nano-Tex rivaliza la firma suiza Schoeller Textil AG, cuya técnica ha sido bautizada con el nombre de NanoSphere. El sistema en cuestión deposita sobre las fibras textiles partículas de escala nanométrica de sílice o de un polímero, con lo que se consigue una rugosidad fina, semejante a la del loto.

Debido a las numerosas reivindicaciones en favor de productos de nanotecnia aún sin contrastar, los organismos de normalización han comenzado a implantar pruebas muy rigurosas para los tejidos autolimpios. En octubre de 2005, el Instituto de Investigación alemán Hohenstein (que ofrece pruebas y certificaciones a mercados e industrias de todo el mundo) anunció que los textiles de NanoSphere habían sido los primeros de su género en superar la serie completa de pruebas. Entre ellas, las de la repelencia al agua, así como la capacidad del tejido para mantener su funcionalidad tras los ciclos ordinarios de lavado y los desgastes propios del uso. El autor ha podido comprobar lo bien que rechazaba este material las manchas de salsas de tomate, café o vino tito, que figuran entre las peores y más habituales.

Si bien la ropa de limpieza fácil ya se está comercializando, se espera que los tejidos tratados con efecto loto encuentren su mayor potencial de mercado entre los compradores de toldos, tiendas de campaña o marquesinas. A nadie agrada tener que limpiar estructuras de intemperie tan grandes.

ANN SANDERSON (*ilustraciones*); NACIVET *Getty Images* (*arriba a la izquierda*); WILHELM BARTHLOTT *Universidad de Bonn* (*arriba centro y derecha*)

Sumamente humedecibles

Las investigaciones sobre el efecto loto comenzaron con el objeto de entender las propiedades de autolimpieza de un tipo particular de superficies; las de textura cérea con rugosidades microscópicas o de escala nanométrica. Hoy, la investigación se ha extendido hasta crear una disciplina nueva: la del estudio de las afinidades extremas al agua que presentan diversos materiales. Se ha descubierto que existen diferentes maneras de obtener superficies hiperhidrófobas. Pero además, las de propiedades opuestas (hiperhidrófilas) también resultan sobremanera interesantes. Entre estas últimas desempeña un papel central el dióxido de titanio.

La popularidad de este material comenzó a finales de los años sesenta gracias a una propiedad que nada tenía que ver con su afinidad por el agua. En 1967, Akira Fujishima, por entonces alumno de doctorado en la Universidad de Tokio, descubrió que, al someterlo a la luz ultravioleta, el dióxido de titanio descomponía el agua en hidrógeno y oxígeno. Este fenómeno (fotolisis) ha sido considerado durante mucho tiempo como una especie de "piedra filosofal". La razón se debe a que, si un proceso de tales características fuese lo bastante eficiente, podría emplearse para generar hidrógeno a bajo costo, lo que a su vez lo convertiría en una alternativa viable y exenta de carbono a los combustibles fósiles. Fujishima y otros investigadores persiguieron esa línea con empeño, hasta que finalmente hubieron de admitir que se encontraban muy lejos de una producción rentable.

Pero las investigaciones sí pusieron de manifiesto que, en las películas delgadas (con un espesor del orden de nanómetros o micrometros), la fotolisis era más eficiente que en las de mayor tamaño. En 1990, Fujishima, junto con Kazuhito Hashimoto, de la Universidad de Tokio, y Toshiba Watanabe, de la empresa TOTO, descubrieron que, al ser irradiadas con luz ultravioleta, las películas de espesor nanométrico ejercían un efecto fotocatalizador: descomponían los compuestos orgánicos en dióxido de carbono y agua.

Esa particularidad obedece al carácter semiconductor del dióxido de titanio. Una energía moderada puede promocionar un electrón desde la banda de valencia (cuyos niveles de energía se encuentran ocupados), haciendo que "salte" los niveles de energía prohibidos, hasta alcanzar la banda de conducción (desocupada). Allí, los electrones pueden circular libremente y formar una corriente. En el caso del dióxido de titanio, el fenómeno puede lograrse con un fotón de luz ultravioleta con una longitud de onda de unos 388 nanómetros. En el proceso se producen dos cargas móviles: el electrón que promociona hasta la banda de conducción y el "hueco" (defecto de carga negativa) que se deja en la banda de valencia. De manera efectiva, el hueco se comporta igual que una carga positiva móvil (*véase el recuadro* "Autolimpieza en el TiO_2").

Las dos cargas pueden interactuar con el agua y el oxígeno de la superficie, produciendo aniones de radical superóxido (O_2^-) y radicales hidroxilo (OH). Ambas especies químicas, fuertemente reactivas, disocian los compuestos orgánicos en dióxido de carbono y agua.

A mediados de los noventa, los tres investigadores japoneses descubrieron otra propiedad crucial del dióxido de titanio. A partir de una suspensión acuosa de partículas del material, prepararon una película delgada que posteriormente recocieron a 500 grados Celsius. Al exponer a la luz ultravioleta el recubrimiento transparente obtenido, éste resultó poseer la extraordinaria cualidad de ser *completamente* humedecible: es decir, el ángulo de contacto entre el fluido y la superficie era de cero grados; comportamiento del que hacían gala tanto el agua como el aceite. La luz ultravioleta había eliminado algunos de los átomos de oxígeno de la superficie, con lo que ésta quedaba par-

PERMANENTEMENTE LIMPIOS

Diversas compañías han fabricado textiles capaces de rechazar el agua y los restos de comida (*arriba*) debido a su naturaleza hiperhidrófoba, semejante a la de la hoja del loto. El efecto se consigue modificando las fibras de algodón, una a una. En el ejemplo ilustrado (*abajo*), las partículas forman sobre las fibras protuberancias de varios cientos de nanómetros. Otros productos, como tejas o pinturas para fachadas, consiguen el efecto loto mediante un acabado rugoso de escala micrométrica o nanométrica.





Fibra de algodón sin tratar — Fibra de algodón tratada

HIDROFILIA E HIDROFOBIA

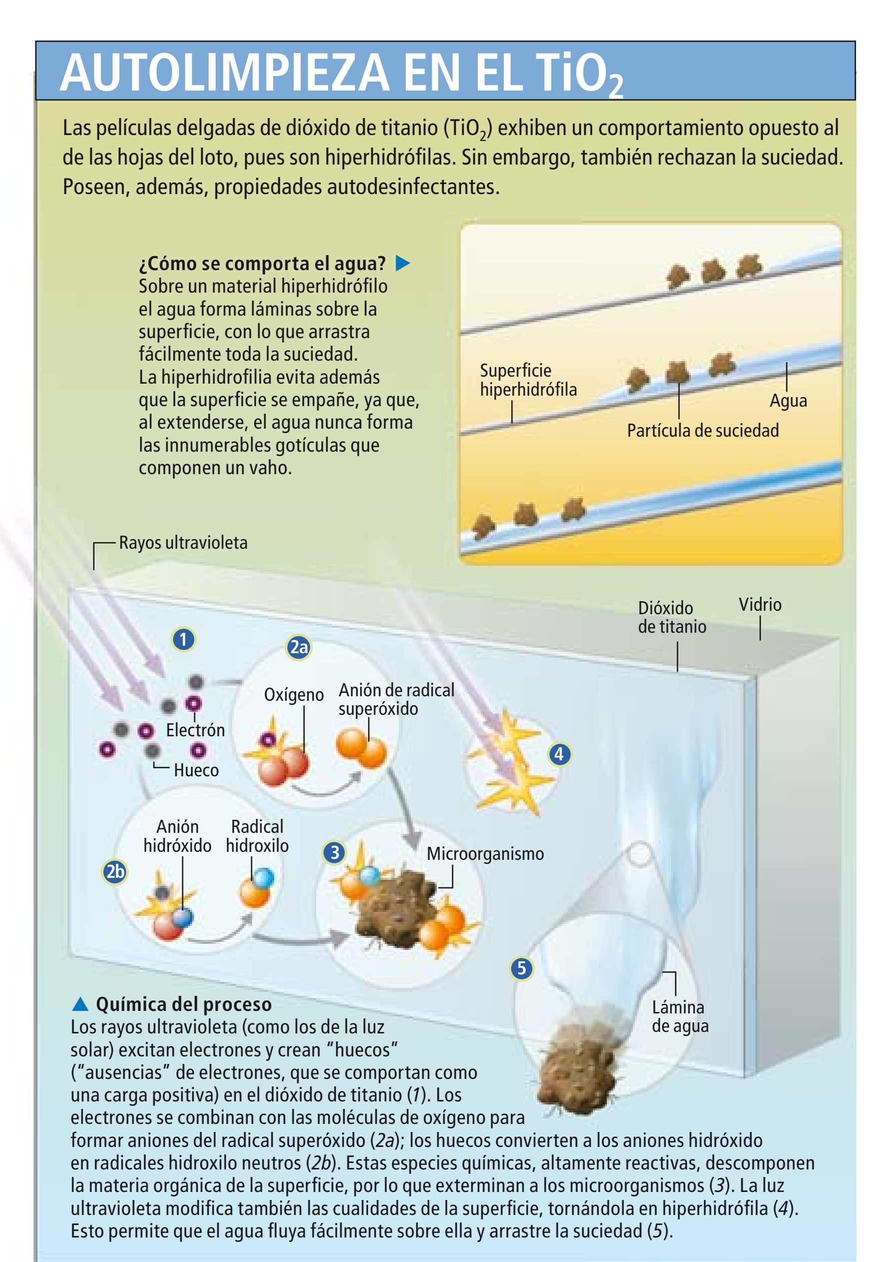
He aquí algunos ejemplos de superficies caracterizadas en función de su afinidad al agua y sus ángulos de contacto:

- Hiperhidrófilas: películas delgadas de dióxido de titanio; 0 grados (*véase el recuadro* "Autolimpieza en el TiO_2")
- Hidrófilas: vidrios de ventana ordinarios; 30 grados
- Hidrófobas: teflón, 100 grados
- Hiperhidrófobas: hoja del loto, 160 grados

NANO-SPHERE (*arriba*); DANIELA NAOMI MOLNAR (*abajo*)

AUTOLIMPIEZA EN EL TiO_2

Las películas delgadas de dióxido de titanio (TiO_2) exhiben un comportamiento opuesto al de las hojas del loto, pues son hiperhidrófilas. Sin embargo, también rechazan la suciedad. Poseen, además, propiedades autodesinfectantes.



¿Cómo se comporta el agua? ▶ Sobre un material hiperhidrófilo el agua forma láminas sobre la superficie, con lo que arrastra fácilmente toda la suciedad. La hiperhidrofilia evita además que la superficie se empañe, ya que, al extenderse, el agua nunca forma las innumerables gotículas que componen un vaho.

▲ **Química del proceso** Los rayos ultravioleta (como los de la luz solar) excitan electrones y crean "huecos" ("ausencias" de electrones, que se comportan como una carga positiva) en el dióxido de titanio (*1*). Los electrones se combinan con las moléculas de oxígeno para formar aniones del radical superóxido (*2a*); los huecos convierten a los aniones hidróxido en radicales hidroxilo neutros (*2b*). Estas especies químicas, altamente reactivas, descomponen la materia orgánica de la superficie, por lo que exterminan a los microorganismos (*3*). La luz ultravioleta modifica también las cualidades de la superficie, tornándola en hiperhidrófila (*4*). Esto permite que el agua fluya fácilmente sobre ella y arrastre la suciedad (*5*).

ANN SANDERSON

Las propiedades bactericidas y desodorizantes del dióxido de titanio auguran una abundancia de aplicaciones en cocinas e instalaciones sanitarias.

cheada de "retales" de dimensión nanométrica en los que los grupos hidroxilo se adsorbían y creaban propiedades hiperhidrófilas. Las zonas ajenas a esos "retales" eran las responsables de la gran afinidad hacia las grasas. El efecto persistía varios días después de la exposición al ultravioleta, si bien en ausencia de iluminación el dióxido de titanio recuperaba lentamente su condición original.

Aunque en el extremo opuesto de la repulsión al agua propia de la hoja del loto, la hiperhidrofilia favorece también la autolimpieza. El agua se extiende a lo largo de toda la superficie y forma una lámina que, al escurrirse, arrastra consigo la suciedad. Además, las superficies hiperhidrófilas evitan que el vapor de agua las empañe, ya que el agua que condensa sobre ellas fluye rápidamente, sin formar sobre el material los millares de gotas minúsculas. Por otra parte, la fotocatálisis característica del dióxido de titanio descompone la materia orgánica y mata a los microorganismos, por lo que los objetos recubiertos con esta sustancia no sólo se autolimpian, sino que además se desodorizan y desinfectan.

La industria de los revestimientos de dióxido de titanio se encuentra hoy en expansión. La compañía TOTO fabrica toda una gama de productos fotocatalizadores autolimpios, como azulejos cerámicos para exteriores, al tiempo que concede licencias para utilizar su técnica por todo el mundo.

Dada la transparencia de tales revestimientos, un uso obvio es su aplicación en vidrios para ventanas. El primero en llegar al mercado (en 2001) fue Activ Glass, desarrollado por Pilkington, el mayor fabricante británico de vidrio. Una manera de obtener vidrio es a unos 1600 grados Celsius sobre un sustrato de estaño fundido. Para conseguir Activ Glass, en una fase posterior de enfriamiento se hace pasar sobre el vidrio vapor de tetracloruro de titanio, que deposita una capa de dióxido de titanio de menos de 20 nanómetros de espesor. Se trata de un material de opción creciente como solución óptima para techos de invernaderos y retrovisores de vehículos en el Reino Unido.

Desafortunadamente, los vidrios de ventana ordinarios absorben las radiaciones ultravioleta que desencadenan la fotocatálisis, por lo que los revestimientos de dióxido de titanio son más útiles en el exterior que en interiores. Para resolver tal inconveniente, se dopa con algunas impurezas el dióxido de titanio, práctica habitual en otros semiconductores. Un dopaje adecuado reduce el intervalo energético de la banda prohibida. Eso significa que el alumbrado interior, menos energético que la luz ultravioleta, puede también activar la fotocatálisis.

En 1985, Shinri Sato, de la Universidad de Hokkaido, descubrió de manera fortuita las ventajas de emplear nitrógeno para dopar el dióxido de titanio. La plata constituye también un dopaje propicio. Sin embargo, sólo recientemente se han comenzado a explotar comercialmente las nuevas posibilidades.

Es de esperar que las propiedades bactericidas y desodorantes del dióxido de titanio dopado encuentren extensa aplicación en hospitales, cocinas y cuartos de baño. El dióxido de titanio se emplea además en textiles autolimpios, con la ventaja adicional de que suprime los olores. Ya se han ideado diversas técnicas para fijarlo a los tejidos.

Convergencia de opuestos

Las superficies inspiradas en el loto y los recubrimientos de dióxido de titanio suponen

extremos opuestos que raramente aparecen en nuestra vida cotidiana. Los materiales y las técnicas empleadas fueron completamente diferentes durante mucho tiempo, por lo que la hiperhidrofobia y la hiperhidrofilia fotocatalítica se investigaron con total independencia. No obstante, en los últimos años se ha producido una unificación notable. Actualmente existen estudios dedicados a combinar ambos efectos y a obtenerlos a partir de materiales muy similares. También se están explorando procedimientos para conseguir que una misma estructura pase de ser hiperhidrófoba a hiperhidrófila, y a la inversa.

Serían precisamente Fujishima, Watanabe y Hashimoto, los pioneros en la técnica del dióxido de titanio, quienes en el año 2000 aportarían uno de los primeros indicios acerca de esa unificación. Se proponían utilizar dióxido de titanio para prolongar la vida de las superficies tratadas con efecto loto. A primera vista, la táctica parecía abocada al fracaso. Era de temer que la acción fotocatalizadora del dióxido de titanio atacase el revestimiento céreo característico de las superficies con efecto loto, destruyendo su efecto hidrófobo. De hecho, así ocurre para grandes concentraciones de dióxido de titanio. Sin embargo, concentraciones ínfimas del material sí se mostraban capacitadas para prolongar sensiblemente la actividad del efecto loto, sin variar en demasía el gran ángulo de contacto, necesario para una fuerte repulsión.

En 2003, el equipo de M. Rubner y R. Cohen, del MIT, descubrió que cierta modificación mínima en el proceso de fabricación de una superficie podía determinar si ésta se comportaba como hiperhidrófoba o como hiperhidrófila. Durante un congreso en China en aquel mismo año, Rubner quedó impresionado por cierto tipo de estructuras hiperhidrófobas que fueron presentadas allí. A su regreso, intentó junto a su equipo reproducirlas en el laboratorio. Previamente habían desarrollado una técnica para fabricar, capa a capa, delgadas películas de ciertos compuestos llamados polielectrolitos.

Los electrolitos comunes son sustancias que, al disolverse en agua, se descomponen en aniones y cationes (como la sal común y el ácido sulfúrico, por ejemplo). Los polielectrolitos son polímeros orgánicos, materiales plásticos que, a diferencia de la mayoría de los polímeros, poseen carga eléctrica, positiva o negativa. Rubner y Cohen apilaron alternativamente capas de un polímero de carga positiva (hidrocloruro de alilamina) y de partículas de sílice, de carga negativa. (En investigaciones anteriores ya habían empleado revestimientos de sílice para emular la rugosa superficie del loto.)

A esas multicapas añadieron un revestimiento final de silicona (material hidrófobo). Sin embargo, notaron algo curioso: antes de aplicar la silicona, el bloque multicapa se había tornado hiperhidró*filo*. En el curso de la experiencia, las capas de sílice habían creado una vasta red de nanoporos que, a modo de esponja, absorbían instantáneamente cualquier gota de agua de la superficie. Este fenómeno se denomina nanoabsorción capilar (*nanowicking*). Las multicapas de sílice y polímeros no se empañan aunque se encuentren sobre un recipiente con agua hirviendo. Si los poros se saturan, el agua comienza a escurrir por los bordes. Cuando la situación de humedad desaparece, el agua en los nanoporos se va evaporando poco a poco.

Dichas multicapas son muy adecuadas para su aplicación al vidrio, material compuesto, en su mayor parte, por sílice. Además de ser transparentes y no empañarse, los revestimientos hiperhidrófilos son antirreflectantes. Actualmente el grupo de Rubner colabora con socios industriales para comercializar el descubrimiento. Entre sus aplicaciones potenciales podemos mencionar espejos de baño o

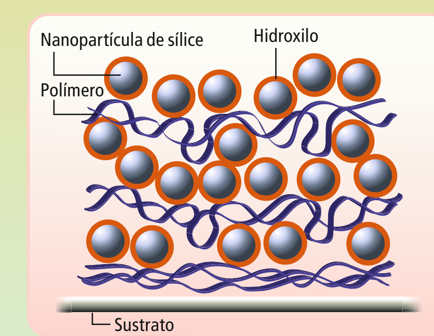
El autor

Peter Forbes es escritor de temas científicos. En su obra *The Gecko's Foot*, publicada en 2006 por W. W. Norton, recorría una gran diversidad de técnicas inspiradas en sistemas biológicos (biomiméticas). Fue asimismo coordinador de *Scanning the Century: The Penguin Book of the Twentieth Century in Poetry* (Penguin, 2000).

CRISTALES SIN VAHO

En el Instituto de Tecnología de Massachusetts se han desarrollado revestimientos multicapa hiperhidrófilos que impiden la formación de vaho y son antirreflectantes.

Las capas alternas de polímeros y nanopartículas de sílice (cuya superficie presenta grupos hidroxilo adheridos) forman un revestimiento hiperhidrófilo apto para aplicarse al vidrio y otros materiales. A escala nanométrica la superficie es rugosa, pero el hidroxilo muestra una fuerte hidrofilia, lo que provoca que los nanoporos entre las capas absorban instantáneamente el agua, extrayéndola de la superficie.





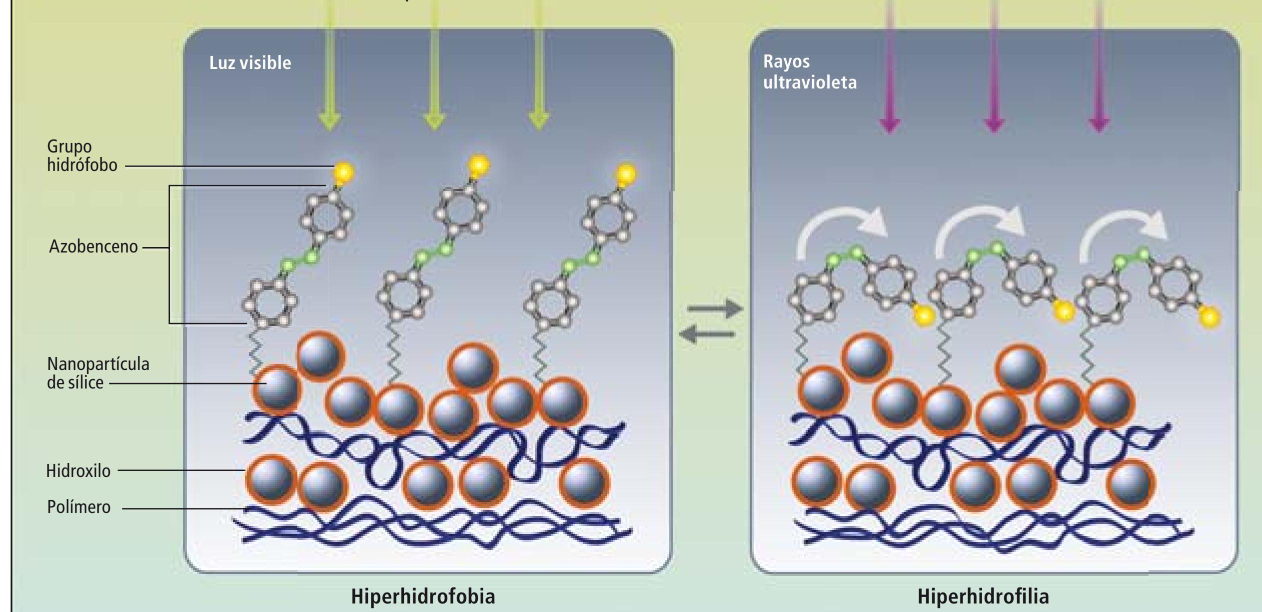
Una lámina de vidrio tratada con multicapas preserva su transparencia aunque se enfríe en una nevera y se exponga después al aire húmedo y caliente (*izquierda*), circunstancias bajo las que un vidrio sin tratar se empañaría (*derecha*).

MICHAEL RUBNER *Instituto de Tecnología de Massachusetts (loto tras el vidrio)*; ANN SANDERSON *(ilustración)*



SUPERFICIES CONMUTABLES

Al alternar las cualidades hidrófobas o hidrófilas en zonas determinadas de una superficie, se espera poder controlar la circulación de los fluidos en redes de canales microscópicos.



▲ Los investigadores de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Pohang, en Corea del Sur, depositaron moléculas basadas en azobenceno sobre las multicapas de polímero y sílice (*véase el recuadro* "Cristales sin vaho"). La adición de un grupo hidrófobo en el extremo de la molécula, unida a la rugosidad de las capas, torna en hiperhidrófoba la superficie (*izquierda*). Bajo la luz ultravioleta, sin embargo, la molécula se pliega, enterrando al grupo hidrófobo y convirtiendo en hiperhidrófila toda la superficie. La luz visible reestablece rápidamente las condiciones originales.

◀ Esta superficie tratada ha sido iluminada con cuatro haces de luz ultravioleta de contorno rectangular. Las zonas expuestas a ellos son hiperhidrófilas, por lo que el agua se adhiere a ellas. El agua depositada en otras áreas forma las características gotas casi esféricas del efecto loto.

parabrisas que nunca se empañan. A diferencia del dióxido de titanio, estas superficies operan igualmente bien en la luz y en la oscuridad.

Escarabajos inteligentes

Millones de años antes de que se descubriesen las aplicaciones técnicas del efecto loto y de los materiales hiperhumedecibles, un pequeño escarabajo del desierto del Namib ya empleaba ambos efectos para sus fines particulares: capturar agua para su propia supervivencia.

El desierto del Namib es extremadamente inhóspito, con temperaturas diurnas que alcanzan los 50 grados y escasísimas lluvias. Las espesas nieblas matinales constituyen prácticamente la única fuente de humedad. El escarabajo *Stenocara* sp. ha desarrollado un método para recoger el agua contenida en esa niebla. Agachando la cabeza y alzando el dorso contra la brisa húmeda, consigue que el agua se condense sobre sus élitros y fluya hacia la boca. La base científica de este comportamiento ha inspirado técnicas para el acopio de agua en regiones áridas.

Como tantas otras veces, el mecanismo de recolección de agua de *Stenocara* fue descubierto por un investigador que, en realidad, perseguía otro fin. En 2001, Andrew R. Parker, el zoólogo de la Universidad de Oxford, halló una fotografía de escarabajos que devoraban una langosta en el desierto del Namib. La langosta, arrastrada hacia allí por los fuertes vientos, habría perecido de calor en el momento de tocar la arena. Sin embargo, los escarabajos no parecían resentirse de sufrir por las altas temperaturas. Parker supuso que su exoesqueleto debía poseer algún complejo mecanismo de reflexión térmica.

Por supuesto que el exoesqueleto de *Stenocara* refleja el calor, pero cuando Parker examinó su dorso, supuso que en el proceso de acopio de agua debía intervenir algún mecanismo similar al efecto loto. Casi toda su superficie dorsal, de contextura cérea y erizada, es hiperhidrófoba. Pero, justo en su extremo superior, las protuberancias no son céreas y poseen propiedades hidrófilas. Estas zonas hidrófilas capturan el agua de la niebla, propiciando la

Las aplicaciones de las superficies hiperhidrófilas e hiperhidrófobas van mucho más allá de la autolimpieza.

KILWON CHO *Universidad de Ciencia y Tecnología de Pohang (superficie conmutable)*; ANN SANDERSON (*ilustración*)

formación de gotículas que rápidamente crecen lo suficiente como para caer y fluir sobre la superficie hiperhidrófoba.

Experimentando con láminas de vidrio, Parker halló que la eficiencia de una estructura tal era aproximadamente el doble que la de una superficie uniforme, ya sea hidrófila o hidrófoba.

Parker ha patentado un diseño que imita el mecanismo del escarabajo. QinetiQ, contratista de defensa del Reino Unido, lo está desarrollando para recoger el agua de la niebla en regiones áridas. Existen también otros intentos de emular a *Stenocara*. En 2006, el equipo de Rubner y Cohen consiguió depositar puntos de sílice hiperhidrófilos sobre una película de multicapas hiperhidrófobas. Constituye una clara mejora con respecto a las protuberancias dorsales del escarabajo, cuyos extremos son hidrófilos.

Laboratorios en miniatura y otras aplicaciones

Como ponen de manifiesto las superficies de tipo *Stenocara* artificiales, es posible controlar flujos líquidos a escalas micrométricas y nanométricas. Las aplicaciones del fenómeno trascienden la mera conservación limpia de una superficie. El descubrimiento de que una superficie particular puede tornarse hiperhidrófoba o hiperhidrófila en función de la composición química de su capa superior abre posibilidades de todo tipo. Particularmente útiles podrían resultar las superficies conmutables, aquellas cuyo carácter pueda invertirse en puntos precisos.

Esa variabilidad puede lograrse con distintos medios: con luz ultravioleta, electricidad, cambios de temperatura, empleo de disolventes o modificaciones de la acidez. En 2006, un equipo dirigido por Kilwon Cho, de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Pohang, en Corea del Sur, consiguió una conmutabilidad total al depositar, sobre cierta superficie hiperhidrófoba (una multicapa de polielectrolito y sílice, tratada a su vez con silicona) un compuesto basado en el azobenceno. La superficie resultante es hiperhidrófoba, pero su exposición al ultravioleta modifica el estado del compuesto azobencénico y la convierte en hiperhidrófila (*véase el recuadro* "Superficies conmutables").

Por otro lado, la exposición a la luz visible invierte el cambio. Los controles de este género podrían tener aplicaciones cruciales en el campo de los canales microscópicos de fluidos, como los microsistemas empleados hoy en día para la selección de fármacos y otras pruebas bioquímicas [*véase* "Un laboratorio en un chip", por Charles Q. Choi; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2008]. Por ejemplo, podrían abrir o cerrar canales hidrófilos mediante la conmutación de las propiedades de algunos de sus tramos.

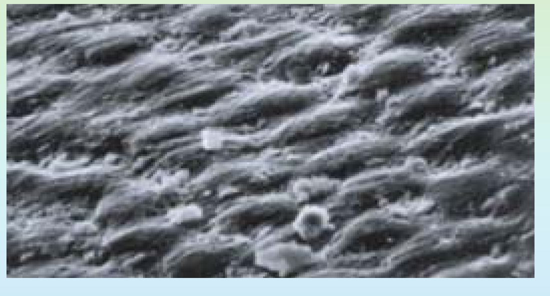
Los primeros años del siglo han llevado las propiedades del loto hacia aplicaciones completamente insospechadas que en absoluto se limitan a la autolimpieza. Actualmente, Wilhelm Barthlott investiga sobre la hidrofobia bajo el agua. Tras estudiar el comportamiento de plantas como la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) y el helecho flotante *Salvinia*, que retienen aire sobre sus hojas, Barthlott ha logrado sintetizar tejidos que se mantienen secos aun después de cuatro días sumergidos. Sus aplicaciones van desde los trajes de baño hasta reducir la resistencia al avance en los cascos de los buques. El loto no acumula suciedad, pero sí una lista impresionante de patentes.

RECOLECCION DE AGUA

Inspirados por un escarabajo que habita en el desierto, los científicos desarrollan dispositivos que combinan el efecto loto y la hiperhidrofilia para recoger agua de la atmósfera en regiones áridas.



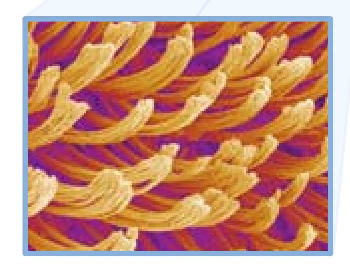
El escarabajo *Stenocara* sp. se encorva y levanta el dorso frente al viento (*izquierda*) para recoger el agua que arrastran las nieblas matinales del desierto del Namib. La mayor parte de su dorso es hiperhidrófoba, debido a la rugosidad microscópica de su superficie cérea (*abajo*). Sin embargo, en las minúsculas puntas hidrófilas que coronan las protuberancias microscópicas, condensan gotículas de agua que fluyen hacia la boca del insecto.



BIOMIMETISMO

La biología inspira el desarrollo de técnicas nuevas. He aquí algunos ejemplos:

- Pelos nanoscópicos (*abajo*), que permiten a las lagartijas andar por el techo.
- Adhesivos como el del mejillón, que actúan bajo el agua.
- Telas de araña, de una resistencia proporcional superior a la del acero.



Bibliografía complementaria

THE LOTUS EFFECT. Hans Christian von Baeyer en *The Sciences*, vol. 40, n.º 1, págs. 12-15; enero-febrero de 2000.

WATER CAPTURE BY A DESERT BEETLE. Andrew R. Parker y Chris R. Lawrence en *Nature*, vol 414, págs. 33-34; 1 de noviembre de 2001.

SELF-CLEANING SURFACES — VIRTUAL REALITIES. Ralf Blossey en *Nature Materials*, vol. 2, n.º 5, págs. 301-306; mayo de 2003.

THE GECKO'S FOOT. Peter Forbes. W. W. Norton, 2006.

PATTERNED HIPERHYDROPHOBIC SURFACES: TOWARD A SYNTHETIC MIMIC OF THE NAMIB DESERT BEETLE. Lei Zhai y otros en *Nano Letters*, vol. 6, n.º 6, págs. 1213-1217; junio de 2006.

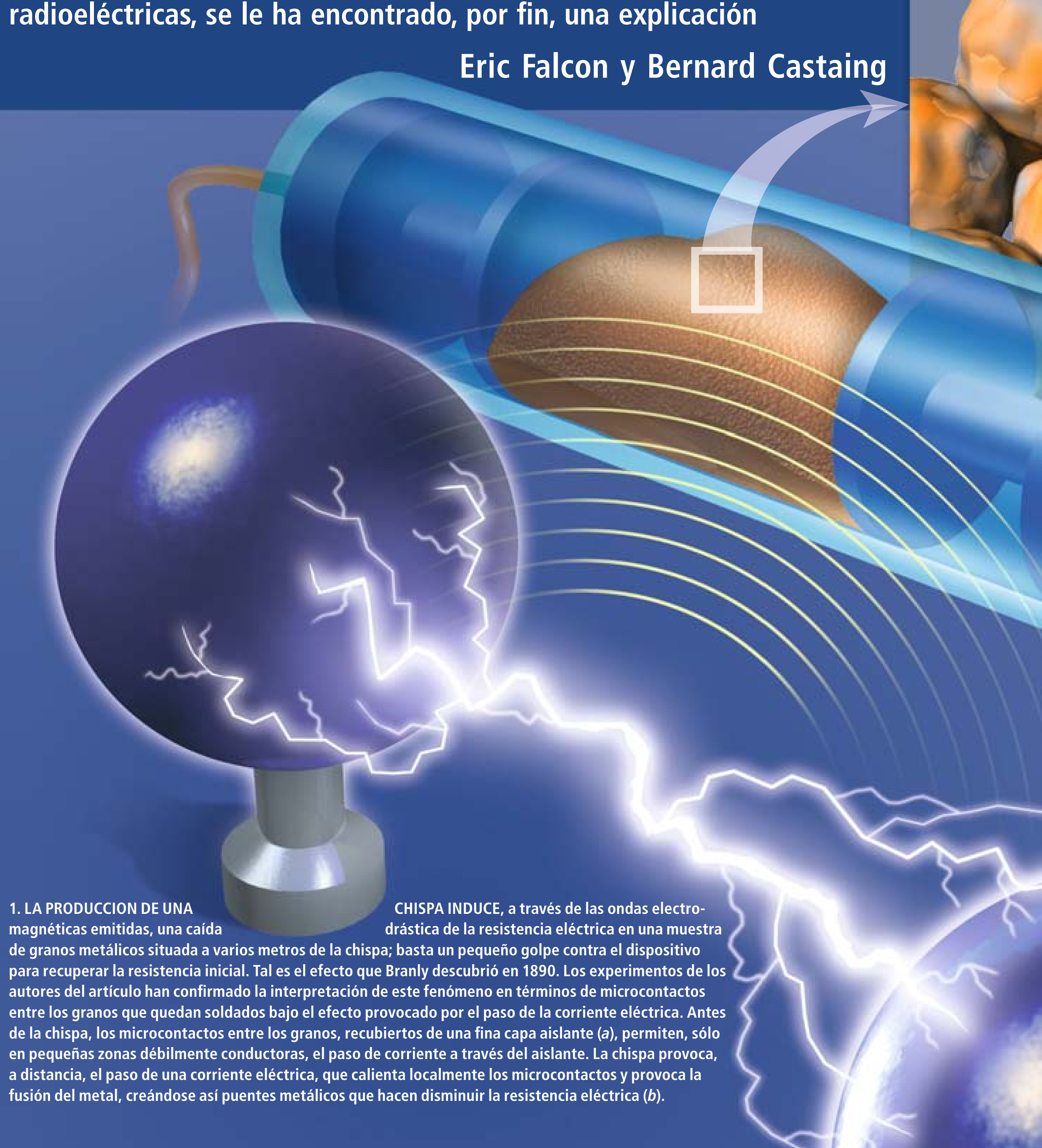
THE DREAM OF STAYING CLEAN; LOTUS AND BIOMIMETIC SURFACES. Andreas Solga, Zdenek Cerman, Boris F. Striffler, Manuel Spaeth y Wilhelm Barthlott en *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 2, n.º 4, págs. S126-S134; diciembre de 2007.

CORTESIA DE ANDREW R. PARKER (*escarabajo*); "WATER CAPTURE BY A DESERT BEETLE", POR ANDREW R. PARKER Y CHRIS R. LAWRENCE, EN *NATURE*, VOL. 414, PAGS. 33-34; 1 DE NOVIEMBRE DE 2001 (*superficie del escarabajo*); REUTERS/CORBIS (*lagartija*); VISUALS UNLIMITED/CORBIS (*detalle de la pata*)

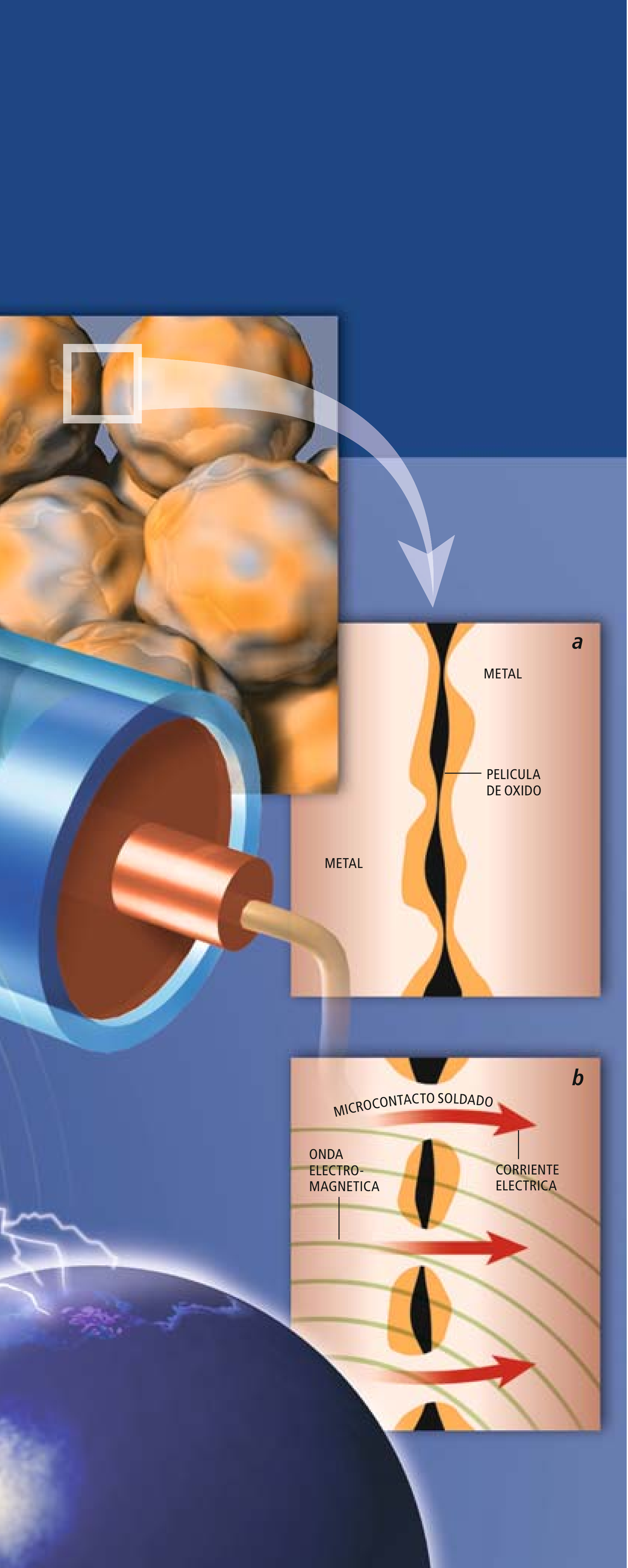
El efecto Branly

Hace ya más de un siglo, Edouard Branly descubrió que una chispa eléctrica actuaba a distancia sobre un agregado de granos metálicos. A este fenómeno, en el que se basaron las primeras comunicaciones radioeléctricas, se le ha encontrado, por fin, una explicación

Eric Falcon y Bernard Castaing



1. LA PRODUCCION DE UNA CHISPA INDUCE, a través de las ondas electromagnéticas emitidas, una caída drástica de la resistencia eléctrica en una muestra de granos metálicos situada a varios metros de la chispa; basta un pequeño golpe contra el dispositivo para recuperar la resistencia inicial. Tal es el efecto que Branly descubrió en 1890. Los experimentos de los autores del artículo han confirmado la interpretación de este fenómeno en términos de microcontactos entre los granos que quedan soldados bajo el efecto provocado por el paso de la corriente eléctrica. Antes de la chispa, los microcontactos entre los granos, recubiertos de una fina capa aislante (*a*), permiten, sólo en pequeñas zonas débilmente conductoras, el paso de corriente a través del aislante. La chispa provoca, a distancia, el paso de una corriente eléctrica, que calienta localmente los microcontactos y provoca la fusión del metal, creándose así puentes metálicos que hacen disminuir la resistencia eléctrica (*b*).



PHILIPPE MOUCHE/*Pour la Science*

Instituto Católico de París, 1890. Edouard Branly, que ocupa la cátedra de física, estudia la conductividad eléctrica de diversas sustancias. En cierta ocasión, llena con polvos metálicos (limaduras de hierro) un tubo de vidrio. Mide la resistencia eléctrica: en razón del óxido (aislante) que se forma en la superficie de los granos, la resistencia resulta elevadísima. Mas Branly observa que, si produce una chispa eléctrica a varios metros del tubo, la resistencia mengua en varios órdenes de magnitud. Tal disminución colosal de la resistencia eléctrica no es permanente, pues basta un golpecito en el tubo para que los granos tornen al estado aislante de partida.

El cambio de la conductividad eléctrica de los polvos metálicos se debía a las ondas electromagnéticas emitidas por la chispa que alcanzaban el tubo de limaduras. En aquella época, el fenómeno de marras constituía la única manera de detectar las ondas. A finales del siglo XIX, Guillermo Marconi se sirvió del tubo de Branly como receptor de ondas en las primeras comunicaciones de radio sin hilos.

Pasados 115 años del descubrimiento del físico francés, seguía sin explicarse el origen del efecto Branly, la caída en picado de la resistencia eléctrica. Se habían propuesto diversas hipótesis, pero ninguna había sido demostrada: desgarro de la capa de óxido que recubre los granos, conducción de la corriente a través del contacto grano-óxido-grano por un efecto cuántico, atracción de naturaleza electrostática o molecular entre los granos, soldadura local de los microcontactos debida al calentamiento por efecto Joule y otras.

El efecto Branly forma parte de las propiedades eléctricas de los medios granulares, ubicuos y peculiares en sus características, que han atraído el interés de los físicos desde comienzos de los años noventa del siglo pasado. No se trataba de una mera curiosidad. El efecto Branly podría guardar relación con el riesgo de incendio a distancia de combustibles sólidos, provocado por los relámpagos. Un grave incendio de tales características se produjo en 1985 tras la inflamación accidental, bajo el efecto de un rayo que cayó en las proximidades, del combustible de un misil norteamericano *Pershing 2* almacenado en un polvorín de Alemania Occidental. Debemos tener en cuenta que ciertos combustibles sólidos de cohetes y misiles contienen granos de aluminio recubiertos de una capa aislante de alúmina. El accidente acrecentó el interés de la industria por el estudio de la conducción eléctrica en medios granulares y, sobre todo, del efecto Branly.

En nuestro laboratorio de la Escuela Normal Superior de Lyon hemos dado un paso importante en la comprensión del fenómeno. Pero antes de mostrar nuestros experimentos, repasemos la historia del descubrimiento del efecto Branly y de las investigaciones asociadas.

Del descubrimiento al olvido

Muchos fueron los que se anticiparon al descubrimiento de Branly. En 1835, P. Munk de Rösenschold apreció un notable aumento de la conductividad eléctrica de una mezcla de polvos metálicos al incrementar la intensidad de corriente. En 1879, David Hughes observó un fenómeno similar para un contacto imperfecto, constituido por una

CONCEPTOS BASICOS

- Edouard Branly descubrió en 1890 que la producción de una chispa inducía, en una muestra de granos metálicos situada a varios metros de distancia, una disminución de la resistencia eléctrica. Se trataba de un fenómeno temporal: un simple golpecito en la muestra hacía que los granos recuperaran el estado aislante inicial.
- Los autores del artículo han demostrado que el efecto se debe a la formación, por microsoldadura, de pequeños puentes metálicos, que se rompen con un simple choque mecánico.
- El dispositivo de Branly, basado en la acción a distancia de la radiación electromagnética, fue refinado en 1894 por Oliver Lodge. Así nació el primer receptor de telegrafía sin hilos.
- El encendido a distancia, la soldadura en frío, el sinterizado eléctrico y las varistancias se cuentan entre las numerosas aplicaciones eléctricas de los medios granulares.

barra de carbono apoyada sobre dos bloques de carbono que cerraban un circuito eléctrico, o con un tubo lleno de gránulos metálicos (denominado "micrófono" porque había sido concebido para registrar ondas acústicas).

Parece que Hughes descubrió un hecho no menos importante: que un tubo así era sensible a una chispa eléctrica emitida en sus proximidades, como lo indicaba su cambio súbito de conductividad. Mas no convenció a la Regia Sociedad de Londres. Los resultados de Hughes no se publicarían hasta 20 años más tarde, en 1899, bastante después de los descubrimientos de las ondas hertzianas y del efecto Branly. En 1884, Temístocles Calzecchi-Onesti emprendió una serie de experimentos sobre el comportamiento de los polvos metálicos sometidos a una tensión eléctrica. Observó un aumento vigoroso de la conductividad eléctrica, tras sucesivas aperturas y cierres de un circuito formado por una bobina de inducción y un tubo lleno de limaduras.

En 1887, poco después de la publicación de la teoría del electromagnetismo de James Clerk Maxwell, Heinrich Hertz acometió ciertos experimentos que demostraron la existencia y la propagación de ondas electromagnéticas, que llevan hoy día su nombre. Según reseñó, una chispa que emitía una onda electromagnética de alta frecuencia, del orden de 100 megahertz, inducía, a algunos metros de distancia, otra chispa en el intersticio de un hilo metálico curvado en forma de anillo.

Lo que observó Branly en 1890 era la acción a distancia de una onda electromagnética similar. Branly había ingresado en el Instituto Católico a finales de 1875; allí trabajó más de 65 años, hasta su muerte en 1940, a la edad de 96 años. Desde su tesis, defendida en 1873, Branly se había interesado en la conducción eléctrica de diversas sustancias. El año de su descubrimiento, montó un circuito que comprendía una pila eléctrica en serie con un galvanómetro, que permitía detectar corrientes de muy baja intensidad, y un tubo de vidrio repleto de limaduras metálicas.

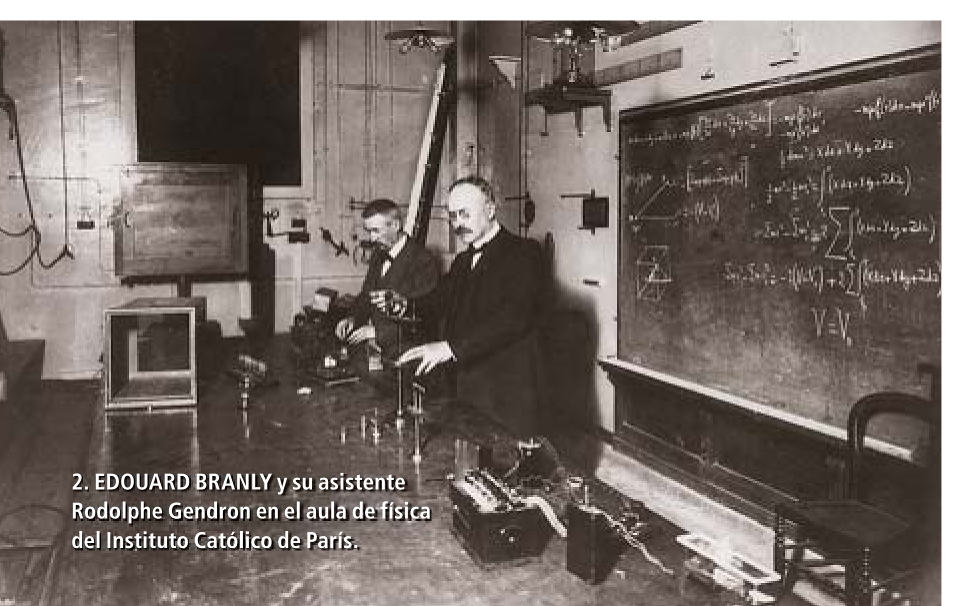
La aguja del galvanómetro apenas se desviaba, debido a la resistencia eléctrica del óxido aislante que, sin duda, se había formado en la superficie de las partículas. En otra sala, a más de 20 metros del circuito, produjo una chispa eléctrica. Comprobó, entonces, que las limaduras se tornaban, de forma "instantánea", conductoras (el galvanómetro indicaba el paso de corriente), a pesar de que ni la luz ni el ruido de las chispas podían percibirse. Un ligero golpecito en el tubo y la corriente quedaba suprimida, si bien se restableció con una nueva chispa.

Branly bautizó su tubo con el nombre de "radioconductor", para recordar que la conductividad del polvo aumentaba bajo la influencia de la radiación eléctrica que emanaba de la chispa. El prefijo "radio" significaba en esa época radiante o radiación. El físico realizó otros experimentos con otros tipos de polvos, comprimidos en diversos grados. Halló que se producía el mismo fenómeno con sólo dos bolas en contacto o, como había anotado Hughes, con dos barras conductoras colocadas una sobre otra: tal contacto imperfecto era muy sensible a una chispa eléctrica emitida en su vecindad.

El descubrimiento tuvo una enorme resonancia en la comunidad científica cuando Oliver Lodge reprodujo en 1894 los experimentos de Hertz, con la ayuda de un tubo de Branly, un "receptor" de ondas más sensible que el anillo de Hertz. Lodge mejoró el tubo de Branly: consiguió un receptor fiable y reproducible. Asimismo, concibió un procedimiento automático para darle al tubo de limaduras un pequeño golpe mecánico, tras los gigantescos incrementos de conductividad, para volver al estado inicial. Nacía así el primer receptor de telegrafía sin hilos (TSH). Lodge denominó "coherente" (del latín *cohaerere*, unir) a su tubo, indicando que las limaduras habían sido "coheridas" bajo el efecto de las ondas y que hacía falta "decohererlas" mecánicamente.

Lodge y Branly se centraron entonces en la interpretación del fenómeno. Prosiguieron sus investigaciones fundamentales sobre los mecanismos de conductividad en los polvos. Apenas se interesaron por las aplicaciones potenciales de su descubrimiento; entre ellas, la transmisión, sin hilos, de señales de radio.

No obstante, puesto que el tubo de limaduras detectaba el paso de una onda electromagnética, la posibilidad de transmitir mensajes a distancia, sin ningún enlace material entre el transmisor y el receptor, se hizo realidad. Las primeras señales de telegrafía sin hilos fueron transmitidas en 1895 por Marconi y, de modo independiente, por Alexandre Popov.



2. EDOUARD BRANLY y su asistente Rodolphe Gendron en el aula de física del Instituto Católico de París.

MARION TOURNON-BRANLY/*Pour la Science*

Este último transmitió, en San Petersburgo, las palabras "Heinrich Hertz" a una distancia de 250 metros. Utilizó luego el tubo receptor de Branly para detectar, a diez kilómetros de distancia, descargas eléctricas atmosféricas como rayos.

Interpretaciones

Acababa de empezar la era de las telecomunicaciones. Mas, ¿quién piensa en Branly, descubridor de la radioconducción e inventor del precursor del mando a distancia, cuando cambia de canal televisivo o abre la puerta del garaje? Su nieta, Marion Tournon-Branly, nos recuerda que la torre Eiffel, una de las mayores antenas de telecomunicaciones de Europa, se alza en el muelle Branly para que su memoria perdure.

¿Cuál es el origen del efecto Branly? En aquella época, las interpretaciones que se ofrecieron fueron numerosas y variopintas. Algunos pensaron que los granos se soldaban entre sí por fusión del metal allí donde pasaba la corriente eléctrica inducida por la onda y que tales contactos se establecían sobre superficies muy restringidas. Según otros, los granos se convertirían, bajo la influencia de la onda, en dipolos eléctricos y se atraerían mutuamente por fuerzas electrostáticas; los granos sufrirían entonces movimientos microscópicos y se "pegarían", formando frágiles cadenas conductoras que se romperían al menor golpe.

Branly nunca creyó en esa hipótesis. Para demostrar que los movimientos de los granos no eran necesarios, los aprisionó en parafina, cera o resina, o bien los reemplazó por una columna de bolas de acero o de discos metálicos sometidos a un peso. Al persistir la acción de coherencia, se convenció de que el efecto guardaba relación con las propiedades del contacto y, sobre todo, con el óxido que aislaba eléctricamente los granos.

En esa línea, Karl Guthe y Augustus Trowbridge llevaron a cabo en 1900 unos experimentos con sólo dos bolas. Pero la invención en 1904 de los tubos de vacío, obra de John Fleming y Lee De Forest, suplantó de forma progresiva el tubo "coherente" en sus funciones de receptor de onda. El efecto Branly terminó cayendo en el olvido, sin haberse desentrañado.

Branly adquirió, sin embargo, cierta notoriedad tras la demostración pública de las maravillas de la telemecánica que se realizó en el Trocadero de París el 30 de junio de 1905. Se presentaron experimentos que iban desde encender a distancia una serie de bombillas hasta disparar remotamente una pistola o provocar la caída de un proyectil de cañón. En 1911 Branly fue elegido miembro de la Academia de Ciencias, ganando por un solo voto nada menos que a Marie Curie. El rastro del coherente se perdió hasta mediados de los años cincuenta del siglo pasado, momento en que se depositó una patente japonesa para el primer juguete con mando a distancia: un autobús que utilizaba un tubo de Branly para detectar las ondas enviadas por el mando.

En el decenio de los sesenta, varios equipos de investigadores intentaron desentrañar el viejo problema del efecto Branly. Así es como alguna de las explicaciones mencionadas al principio de este artículo vieron la luz. Sin embargo, ninguno de los experimentos aducidos reveló los mecanismos que gobiernan el efecto.

c



a



b



FOTOGRAFIAS TOMADAS EN EL MUSEO BRANLY, CORTESIA DE MME MARION TOURNON-BRANLY/*Pour la Science*

3. UNO DE LOS PRIMEROS APARATOS CONSTRUIDOS por Branly para sus experimentos de radioconducción consistía en un tubo radioconductor montado sobre un soporte de madera (*a*). Se introducían en medio del tubo limaduras metálicas, confinadas por dos vástagos metálicos que a su vez se hallaban en contacto con unos hilos metálicos que cerraban el circuito. Algunos aparatos incluían un percutor, un dispositivo que permitía golpear levemente el tubo para devolverlo a su estado inicial de resistencia eléctrica (*b*). Branly efectuó experimentos de radioconducción con diversos medios granulares; en particular, con columnas de gruesas esferas metálicas (*c*).

Los autores

Eric Falcon es investigador del CNRS. **Bernard Castaing** es catedrático y miembro de la Academia de Ciencias. Ambos trabajan en el Laboratorio de Física de la Escuela Normal Superior de Lyon.

La transición de conducción eléctrica observada en los medios granulares metálicos plantea un problema de suma complejidad. Concurren numerosos parámetros relativos al conjunto de los granos (distribución estadística del tamaño y la forma de los granos, reparto espacial de las fuerzas) y al contacto entre cada par de granos (grado de oxidación, estado de la superficie, rugosidad). Para desanudar la cuestión, hemos realizado varios experimentos mediante ringleras de bolas metálicas en contacto, redes bidimensionales de bolas y polvos metálicos.

Experimentos con cadenas de bolas

Al principio, tuvimos que distinguir entre los efectos locales de los contactos entre dos granos y los efectos colectivos del conjunto de granos que pudieran ser responsables del efecto Branly. Es fácil advertir que algunos de estos mecanismos contribuyen sólo de manera secundaria. El mismo Branly había observado que el efecto persiste en el caso simple de un contacto entre dos granos. No podrá, pues, el mecanismo dominante ser un proceso colectivo del tipo precolación, circulación más o menos libre de la corriente eléctrica dependiente de la geometría de la red constituida por el conjunto de contactos.

Por otra parte, cuando se aplica una tensión continua a los polvos metálicos (o a dos bolas en contacto), se observa un efecto similar al que se obtiene a distancia con una onda o una chispa, cuando la tensión alcanza determinado umbral (efecto Branly continuo). Nos centramos en un experimento modelo: el estudio del comportamiento eléctrico de una cadena de bolas metálicas sometidas a una fuente de tensión (o corriente) continua. Redujimos así el número de parámetros del problema, sin perder generalidad. Resaltemos que en el caso del efecto Branly histórico, la onda creada por la chispa produce un campo alterno, no continuo. Más adelante abordaremos la influencia de la naturaleza alterna de la tensión, es decir, de la frecuencia de la onda electromagnética.

Impusimos una corriente eléctrica continua a través de una sarta de unas cincuenta bolas de acero, de diámetro próximo al centímetro. Medimos la tensión en los extremos de la cadena. Obtuvimos así la resistencia: según la ley de Ohm, la relación entre la tensión y la intensidad de la corriente. Como a las bolas no se les prodigó ningún cuidado especial, los contactos no eran metálicos; las recubría una película de óxido o de contaminante, de algunos nanómetros de espesor. Al aumentar la intensidad de la corriente aplicada, observamos una transición de un estado aislante a un estado conductor; la resistencia decreció bruscamente, en un factor cercano al millón. La tensión, por su parte, alcanzó un valor de saturación del orden de 0,4 volt por bola, valor que dependía poco del material del que estaban hechas las bolas.

Lo que resultaba asombroso era la reversibilidad del comportamiento. Cuando disminuía la intensidad de la corriente tras haber aumentado, la resistencia de la cadena seguía siendo débil y casi constante. En otras palabras: la curva que define el comportamiento del sistema en los ejes resistencia-intensidad (o tensión-intensidad) a la ida difería de la dibujada a la vuelta. Tras cada ciclo de intensidad (aumento seguido de disminución), suprimimos la fuerza que comprimía las bolas y las hicimos rodar a lo largo del eje de la cadena para renovar los contactos. Observamos, en cada ocasión, la caída de la resistencia (efecto Branly continuo o efecto cohesor) y la tensión de saturación, todo de manera reproducible.

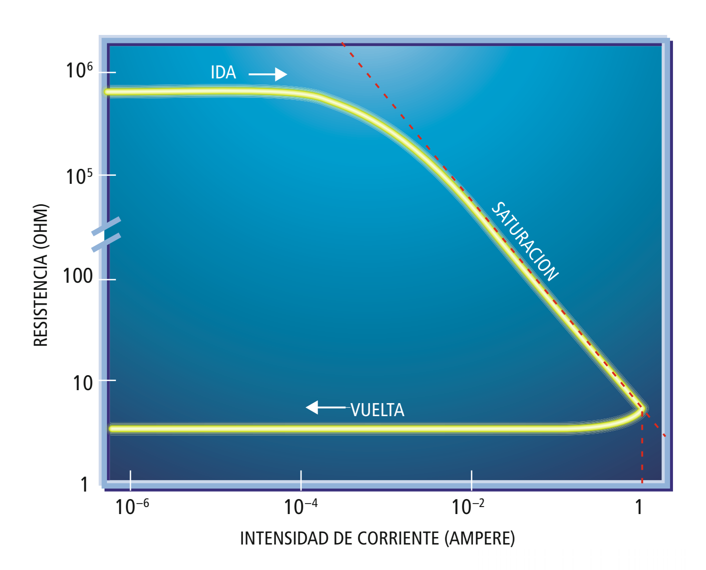
¿Cómo interpretar tales observaciones? Para explicar los fenómenos eléctricos en los materiales granulares, Lodge y Thomas Tommasina

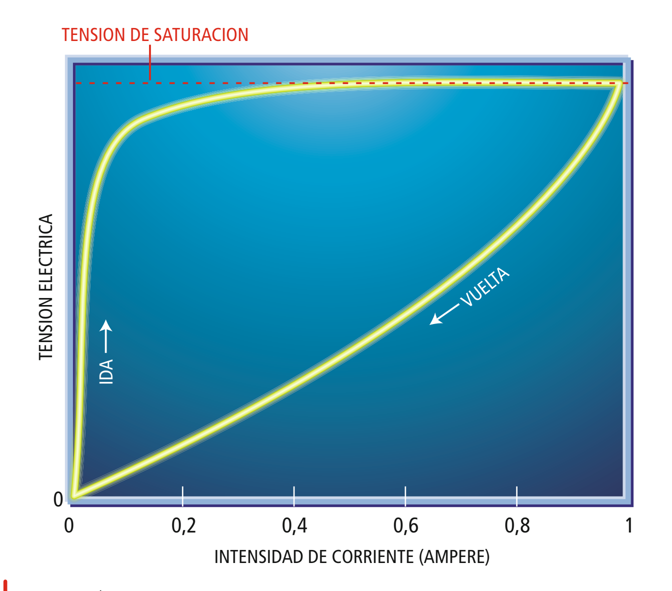




4. EL *RADICON BUS*, un juguete japonés por control remoto de los años cincuenta, que funcionaba gracias al efecto Branly. En la fotografía del vehículo desmontado se aprecia el tubo de limaduras y el martillo decoherente.

ERIC FALCON/*Pour la Science*





venían sugiriendo desde 1898 que las superficies en contacto entre los granos eran tan diminutas, que la densidad de corriente que las atravesaba era enorme y provocaba un calentamiento local que podía provocar la fusión del metal, mejorando así la conducción. Damien Vandembroucq, Claude Boccara y Stéphane Roux, de la Escuela Superior de Física y Química Industrial de París, retomaron esta idea en 1997, al igual que Stéphane Dorbolo y sus colaboradores, de la Universidad de Lieja, en 2000, pero sin llegar a demostrarla. Nuestros experimentos con una cadena de bolas, por el contrario, aportan una prueba cualitativa y cuantitativa. Demuestran que los resultados experimentales coinciden con las predicciones del modelo del contacto entre dos superficies rugosas.

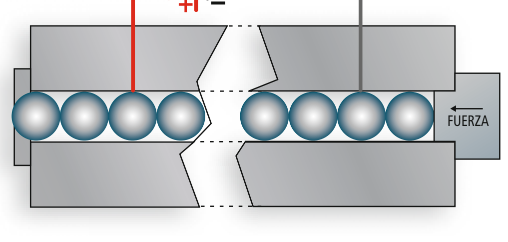
Microcontactos soldados por efecto Joule

Veamos cuáles son las ideas principales de este modelo teórico. Aunque tengan un aspecto liso, las bolas poseen rugosidades del orden de una décima de micrometro. La zona de contacto aparente entre dos bolas es de unos 100 micrometros. Se trata de un contacto aparente; consta de un conjunto disperso de microcontactos de magnitud muy inferior y repartidos de manera holgada. Cuando una corriente eléctrica pasa por uno de esos microcontactos, engendra una cantidad de calor proporcional a la resistencia del conductor y al cuadrado de la intensidad de corriente.

Ahora bien, puesto que la resistencia es inversamente proporcional a la superficie del microcontacto, cuanto menor sea la superficie mayor será la cantidad de calor disipada en el conductor. En las cercanías de los microcontactos entre bolas se produce, pues, un acoplamiento electrotérmico: la corriente eléctrica engendra un calentamiento local, que conlleva un aumento de las áreas de contacto y, por tanto, un aumento de su conductancia (disminución de la resistencia), con la caída consiguiente de la temperatura. En un tiempo del orden de un microsegundo se establece un equilibrio térmico. Los cálculos muestran que la temperatura máxima alcanzada es proporcional a la tensión aplicada a la cadena de bolas y apenas depende del metal o la geometría del contacto.

Una tensión exigua, de sólo 0,4 volt, entre los terminales de un contacto puede causar un aumento de la temperatura de más de 1000 grados, suficiente para fundir la mayoría de los metales. Así, se crearían por microsoldadura pequeños puentes metálicos, que se romperían con un simple choque mecánico. Ello concuerda con los resultados de los experimentos con cadenas de bolas. Al acercarnos a la tensión de saturación, basta el calentamiento para reblandecer los microcontactos. Aumentan las áreas de contacto, de manera que disminuyen las resistencias eléctricas. Cuando se alcanza la tensión de saturación, se funde el metal y se sueldan los microcontactos, lo cual estabiliza las áreas de los microcontactos, la tensión y la temperatura. El fenómeno se autorregula en cuanto a la tensión y la temperatura.

Aparte de la concordancia con el valor experimental de la tensión de saturación, esa interpretación del efecto Branly continuo en términos de microsoldaduras por efecto Joule explica también por qué el parámetro pertinente en los experimentos es la tensión de saturación y no la intensidad de la corriente impuesta. Esclarece también por qué cuando



5. EN LOS EXPERIMENTOS EFECTUADOS por los autores, se hace pasar una corriente eléctrica a través de una hilera de unas cincuenta bolas, de un centímetro de diámetro. Se impone la intensidad de corriente y se mide la tensión eléctrica entre los extremos de la cadena o la resistencia eléctrica de ésta. Se aplica una fuerza constante para apretar las bolas entre sí. La resistencia inicial es del orden de un millón de ohm. Cuando la intensidad aumenta hasta el punto de que la tensión alcanza un valor de saturación de unos 0,4 volt por bola, la resistencia cae bruscamente, hasta sólo unos pocos ohm. Cuando a renglón seguido se disminuye la intensidad, la resistencia se mantiene constante y reducida; pero si se remueven las bolas de manera que se renueven los contactos, la resistencia recupera su nivel inicial.

se disminuye la intensidad de la corriente tras haberla aumentado, no se recupera la resistencia inicial, pues las microsoldaduras son irreversibles (salvo en caso de choque mecánico). Asimismo, ofrece una expresión teórica de la trayectoria de retorno, en el gráfico de tensión frente a intensidad, que concuerda con los resultados experimentales.

Nuestros experimentos conciernen, recordémoslo, al efecto Branly continuo. Si extrapolamos el mecanismo que rige este fenómeno al caso de la modificación de la conductancia bajo el efecto de una onda de radio o de una chispa (escenario del descubrimiento de Branly), podríamos concluir que el parámetro pertinente es la amplitud del campo eléctrico asociado a la onda, no su frecuencia. Pero esto no lo hemos estudiado todavía.

La electricidad, una sonda para los medios granulares

¿Qué aplicaciones ofrecen tan atípicas propiedades eléctricas de la materia granular? Ya hemos señalado su posible relación con el encendido a distancia del combustible sólido de los cohetes bajo la influencia de un rayo. Otra correspondería a una técnica bien conocida en metalúrgica, la soldadura por resistencia eléctrica. Esta "soldadura en frío" entre dos materiales consiste en hacer pasar una corriente eléctrica a través de las piezas que queremos unir y una punta de carbono aplicada sobre la zona que nos proponemos soldar. Puesto que la superficie de contacto de la punta es exigua, la resistencia eléctrica será elevada; el paso de la corriente produce un calentamiento que permite alcanzar pronto la temperatura necesaria para la fusión de los materiales en contacto. Una técnica similar, el sinterizado eléctrico, se emplea para aglomerar polvos metálicos comprimidos. La soldadura se lleva a cabo gracias al paso de corriente eléctrica.

Por otro lado, existe un componente electrónico que muestra el mismo tipo de fenómeno eléctrico que el observado en nuestros experimentos. Nos referimos a la varistancia, un componente en el que la resistencia varía según la tensión aplicada a sus terminales; se utiliza profusamente para proteger de las sobretensiones a los aparatos eléctricos. Tal comportamiento no debería sorprender, si se tiene en cuenta que este componente se fabrica con una cerámica de granos conductores y óxidos metálicos.

También puede pensarse en utilizar las propiedades eléctricas de la materia granular para el estudio de los medios granulares. Dicho de otra manera, la electricidad permitiría sondear los materiales granulares. Se trata de una posibilidad prometedora, puesto que ofrecería una técnica de exploración más local que los métodos acústicos existentes. Las fuerzas mecánicas de un medio granular presentan una distribución muy heterogénea; la mayoría recae sobre una pequeña fracción de los granos, que forman una red de cadenas de fuerza. ¿Podría determinarse la evolución de estas cadenas de fuerzas midiendo la resistencia eléctrica de un montón de granos? ¿Engendran fluctuaciones de la resistencia eléctrica los reajustes mecánicos en el seno del polvo?

Si se dieran tales correlaciones, la medida de la resistencia eléctrica en el agregado granular permitiría comprender mejor, detectar e incluso prevenir la aparición de esos arcos o bóvedas que atascan el flujo de los granos a la salida de un silo (suponiendo que esos granos sean ligeramente conductores).

Ruido y envejecimiento

Los experimentos realizados sobre una cadena de bolas no permiten estudiar los efectos colectivos de la materia granular sobre la conducción de la electricidad. Pero estos efectos pueden observarse mediante experimentos realizados sobre una red bidimensional de bolas o sobre un agregado de limaduras metálicas. Así lo hemos hecho.

Si se aplica una tensión eléctrica constante entre los bornes de unas limaduras metálicas, la evolución temporal de la corriente que las atraviesa es, en determinadas condiciones, muy ruidosa. El ruido eléctrico —fluctuaciones de la resistencia con el paso del tiempo— se debe a la dilatación térmica de los granos, dilatación que crea y destruye localmente contactos; de nuevo, la disipación del calor interviene de manera esencial.

El fenómeno guarda una estrecha semejanza con el movimiento errático de una partícula de fluido en un flujo turbulento; su estudio permite obtener un mejor conocimiento del medio, a la manera en que un mecánico escucha el ruido del motor de un coche para saber si éste se encuentra ajustado.

Mencionemos, para terminar, que la resistencia eléctrica de un medio granular se modifica lentamente con el tiempo. El análisis de la evolución cursada pone de manifiesto características generales de un "envejecimiento", un lento retorno a un estado de equilibrio. Las escalas de tiempo que intervienen en el fenómeno son muy variadas: de menos de un milisegundo a más de una jornada. Las fluctuaciones medidas en el curso de tal relajación presentan una gran riqueza. Permiten comprobar, en una nueva situación, ideas que fueron desarrolladas en otros ámbitos de la física, como la turbulencia hidrodinámica o el envejecimiento de los sistemas fuera de equilibrio.

Bibliografía complementaria

NONLINEAR ELECTRICAL CONDUCTIVITY IN A 1D GRANULAR MEDIUM. E. Falcon, B. Castaing y M. Creyssels en *European Physical Journal B*, vol. 38, págs. 475-483; 2004.

TURBULENT ELECTRICAL TRANSPORT IN COPPER POWDERS. E. Falcon, B. Castaing y C. Laroche en *Europhysics Letters*, vol. 65, págs. 186-192; 2004.

ELECTRICAL CONDUCTIVITY IN GRANULAR MEDIA AND BRANLY'S COHERER: A SIMPLE EXPERIMENT. E. Falcon y B. Castaing en *American Journal of Physics*, vol. 73, págs. 302-307; 2005.

El clima, un debate estancado

Medidas para avanzar hacia una economía de bajo consumo en carbono

Jeffrey D. Sachs



MATT COLLINS

La posibilidad de que EE.UU. apruebe una normativa sobre el cambio climático en el actual período de sesiones del Congreso es cada vez menor: la carrera de obstáculos recuerda la relativa a la asistencia sanitaria, si no más. El presidente Barack Obama no debe confiar en un consenso sobre el cambio climático en su propio partido. Varios senadores demócratas ya le han pedido que no insista en sacar adelante un proyecto de ley en 2010, dada la cercanía de las elecciones de mitad de legislatura.

Las líneas de fractura son innumerables, pero quizá la más importante sea la que afecta a la opinión pública. Según una encuesta reciente, sólo el 36 por ciento de los estadounidenses cree que hay pruebas sólidas del cambio climático de origen antropogénico, cifra inferior al 47 por ciento obtenido a principios de 2008. Tal vez el aumento del desempleo haya hecho a la población más reacia a aceptar cambios que alteren su nivel de vida. También existe mucha confusión alrededor de la ciencia climática y las distintas soluciones propuestas.

Los intereses creados, especialmente sobre el carbón y el petróleo, desempeñan un papel previsible. Ni que sea en pequeñas cantidades, la mitad de los estados produce carbón, y alrededor de otros 30, petróleo. La docena de estados productores más importantes ejercen una oposición política poderosa y bien organizada ante cualquier actuación que pretenda mitigar el cambio climático. También se oponen los estados productores de petróleo del Golfo de México, a pesar de que esa zona quizá ya sufra los daños del cambio climático debido al aumento de la intensidad de los huracanes.

Los grupos ecologistas también se encuentran divididos. Muchos desaprueban la energía nuclear y el uso del carbón, incluso con técnicas de captación y almacenamiento de carbono. Los conservacionistas han luchado contra muchos proyectos de energías renovables, rechazan la energía eólica cerca de los cultivos y la costa, las centrales termosolares en los desiertos y las líneas de transmisión de alto voltaje próximas a zonas residenciales.

Otro factor negativo es el enfoque de la negociación de la legislación sobre el clima. En vez de definir un plan orientado hacia una economía baja en carbono, la Casa Blanca ha dejado las negociaciones en manos del Congreso y los grupos de presión. El resultado ha sido un proyecto de ley descontrolado, poco entendido por la población y repleto de transferencias financieras, ocultas o manifiestas, a intereses creados. Tal es el caso de la asignación de derechos de emisiones en un sistema de comercio de los derechos con fijación previa del límite máximo.

Quizá la normativa se apruebe por escaso margen, lo que en este momento sería la mejor opción. Si, por el contrario, la ley quedara paralizada en primavera, habría que reaccionar rápido y proponer otras medidas. Es necesario un planteamiento nuevo que aborde diferentes aspectos.

Primero, la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. tiene la obligación de actuar conforme a la Ley de Aire Limpio. Podría imponer un calendario de normas de emisión relativas a electrodomésticos y vehículos, ya que juntos contribuyen a alrededor de las tres cuartas partes de las emisiones de carbono. La ley también prevé un amplio respaldo a los fondos destinados a I+D, y aporta soluciones para mejorar el rendimiento energético mediante la ordenanza sobre construcción de edificios sostenibles y adaptados a las inclemencias climáticas.

Segundo, si se paralizara el sistema de comercio de los derechos de emisión, la administración y el Congreso deberían reconsiderar su rechazo a la opción mucho más sencilla de gravar con impuestos el carbono. Una tasa conocida sobre el carbono superaría en eficacia al sistema de comercio de los derechos de emisión, engorroso y falto de transparencia, y quizá consiguiera mayor aprobación como parte de un paquete de reducción del déficit.

Tercero, la población necesita saber que existe un plan. La administración ha asumido el objetivo de reducir un 17 por ciento las emisiones de gases de efecto invernadero de aquí al 2020, pero no ha detallado cómo conseguirlo. La población teme que incluso ese modesto objetivo destruya puestos de trabajo y degrade el nivel de vida. Hay que explicar con claridad los cambios relativos a la generación de electricidad, técnica automotriz y rendimiento energético, que nos ayudarán a alcanzar nuestros objetivos con un coste modesto y un beneficio social enorme.

Cuarto, es preciso reaccionar con firmeza ante los que ponen en duda el cambio climático y desorientan a la población. El *Wall Street Journal* abandera la campaña contra la ciencia del clima publicando editoriales que aducen una conspiración a gran escala entre los científicos. En repetidas ocasiones, he invitado a los redactores del periódico a reunirse con los investigadores del clima para debatir sobre el tema en público, pero nunca han aceptado.

Conviene escuchar las opiniones de John P. Holdren, consejero científico del presidente, de Steven Chu, premio Nobel y ministro de energía, y de la Academia Nacional de Ciencias y otras autoridades. La población apreciará entonces que la comunidad científica trabaja con urgencia, rigor e ingenio para comprender mejor el complejo sistema climático, en aras de nuestra seguridad y bienestar.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

Espumas óptimas

¿Cómo puede una disolución jabonosa encerrar el máximo volumen con el mínimo gasto de material? En cualquier caso, no de la manera más regular

Norbert Treitz

Supongamos que introducimos una estructura de alambre con forma de tetraedro regular en una disolución de detergente y agua. Si lo extraemos con cuidado y, a ser posible, libre de burbujas, observaremos que se han formado seis películas de jabón planas e idénticas, con forma de triángulo isósceles y dispuestas en perfecta simetría. Cada una de ellas se apoya en una de las aristas del tetraedro; el ángulo entre dos películas adyacentes cualesquiera es de 120 grados; todas ellas concurren en el punto central del tetraedro (*figura 2, izquierda*). Si, ya sea por descuido o intencionadamente, al volverlo a sumergir queda encerrada una burbuja en el interior, ésta se verá delimitada por cuatro secciones esféricas, cuyas intersecciones mutuas y con las películas planas adoptan la figura de arcos de circunferencia.



1. Las películas de jabón obedecen leyes de intersección particulares que tienden a minimizar su superficie.

Podríamos pensar que, igual que en otros ejemplos, la simetría de las condiciones de contorno (en este caso, la de la estructura de alambre) determina la simetría del sistema. Pero tal razonamiento sería aquí erróneo. Con independencia de las condiciones de contorno, toda configuración de láminas de jabón satisface las siguientes leyes:

1) Las películas se intersecan siempre en grupos de tres a lo largo de una línea. El ángulo que tienden dos láminas adyacentes cualesquiera es de 120 grados.

2) Las líneas que resultan de la intersección de tres láminas concurren, a su vez, en grupos de cuatro en un mismo punto. Los ángulos que forman estas líneas entre sí vienen siempre dados por el "ángulo tetraédrico" (es decir, el que generan las líneas que unen cada uno de los vértices de un tetraedro regular con su centro): arccos (–1/3) ≈ 109,47 grados.

Estas dos leyes fueron descubiertas por Jospeph Plateau (1801-1883) y se basan en el hecho de que las películas de jabón tienden a formar geometrías en las que la superficie total es mínima [*véase* "Burbujas: simples, múltiples y dobles", por Ian Stewart; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1998]. Dado que su energía superficial es directamente proporcional al área, las configuraciones estables (las de menor energía) son también las que exhiben una superficie mínima.

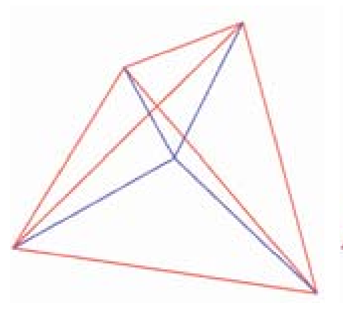
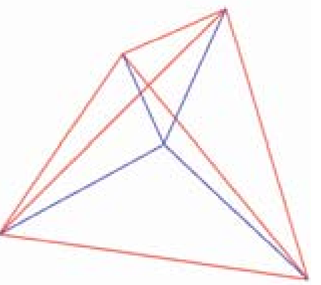
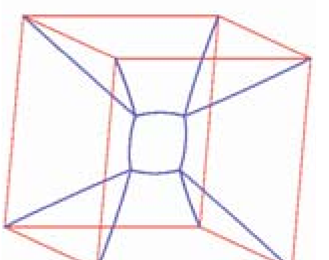
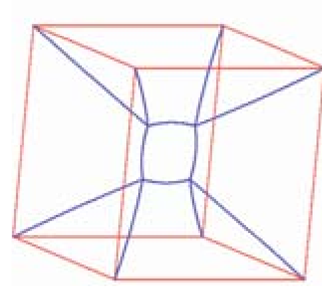
Cuando una superficie no es plana, la curvatura en cada uno de sus puntos depende, en general, de la dirección en la que nos movamos. (Imaginemos, por ejemplo, una silla de montar a caballo: en el punto medio, la curvatura a lo largo de las piernas del jinete es distinta de la curvatura a lo largo de la dirección perpendicular.) En el caso particular de las películas de jabón, otra ley que rige su comportamiento nos dice que la curvatura media (el valor medio de las curvaturas máxima y mínima) en cada punto es proporcional a la diferencia de presión del aire a ambos lados de la lámina. Este principio determina la forma esférica de las pompas de jabón (como consecuencia de una mayor presión interna) o, cuando la presión es igual a ambos lados, el desarrollo de láminas planas o de "superficies minimales".

Pero, ¿por qué 120 grados? Si consideramos un plano imaginario perpendicular a la línea en la que se intersecan tres películas, puede demostrarse que el problema de minimizar el área se reduce al problema de Fermat-Torricelli para un triángulo plano. Pierre de Fermat (1601-1665) quería saber desde qué punto del interior de un triángulo la suma de las distancias a cada uno de los vértices era mínima. Evangelista Torricelli (1608-1647) halló la respuesta: se trata del punto desde el cual los ángulos que describen las líneas que lo unen con los vértices son todos iguales: 120 grados [*véase* "La razón de Steiner", por Ian Stewart; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1994].

El caso de un cubo

Podríamos pensar que una estructura de alambre con forma de cubo no debería deparar demasiadas sorpresas. Si, desde su punto central, trazamos líneas a cada uno de los vértices, el cubo quedará dividido en seis pirámides idénticas, cuyas caras forman ángulos de 120 grados entre sí. Esta es, por tanto, la disposición de películas de jabón que quizá cabría esperar al extraer un cubo de alambre de una disolución jabonosa. ¿Sucede así?

Para entenderlo, consideremos por un momento el problema análogo en dos dimensiones: los cuatro vértices de un

2. Las seis láminas de jabón dividen un tetraedro regular de alambre en cuatro tetraedros iguales (*izquierda*). Un cubo es dividido por 13 películas de jabón en cuatro "tejados" y dos pirámides truncadas (*derecha*). El cuadrado arqueado del centro rompe la simetría inicial del sistema.

cuadrado deben quedar unidos por líneas cuya longitud total sea mínima. Al contrario de lo que pudiera parecer, la solución no es el cruce de ambas diagonales, sino una distribución de líneas que toma una forma intermedia entre una "H" y una "X". La geometría óptima es aquella en la que, en los puntos de bifurcación, las tres líneas que concurren describen ángulos de 120 grados. Este resultado rompe la simetría del cuadrado, pues una rotación de 90 grados no genera la misma figura, sino otra solución igualmente correcta del problema de minimización.

En el caso del cubo, el análogo más obvio de la solución anterior nos lleva a reemplazar el punto donde coincidían las cúspides de las pirámides por una pequeña lámina cuadrada, paralela a dos de las caras del cubo, equidistante de éstas y cuyo punto central coincide con el del cubo. Las pirámides cuyas bases descansaban en las caras del cubo paralelas a la lámina cuadrada se convierten así en pirámides truncadas. Las cuatro pirámides restantes quedan transformadas en estructuras con forma de tejado cuyas cumbreras coinciden con los bordes de la lámina cuadrada central.

Si bien la geometría anteriormente descrita se parece enormemente a la de la película de jabón observada, no puede ser correcta. En primer lugar, las películas que se intersecan en las aristas que van desde el interior hacia los vértices del cubo ya no describen ángulos de 120 grados. Además, los ángulos rectos del cuadrado central deberían ser ángulos tetraédricos. Pero una disolución jabonosa nos da la solución correcta (*figura 2, derecha*): los bordes del cuadrado se curvan ligeramente hacia fuera y agrandan así los ángulos entre ellos. Las otras aristas se curvan igualmente, y las doce láminas que llegan a los bordes del cuadrado se abomban formando superficies no planas, aunque con curvatura media en cada punto igual a cero.

IMAGENES ESTEREOGRAFICAS

El lector ha de bizquear al contemplar las dos figuras hasta observar que la imagen se triplica: la figura central es entonces estereográfica. Otro método consiste en tratar de mirar con los ojos casi paralelos ("hacia el infinito") a través de ambas figuras. Para conseguir la posición correcta, puede emplearse el siguiente método: formando un anillo con los dedos índice y pulgar, mírese a través del agujero de tal forma que, al guiñar los ojos alternadamente, el ojo derecho sólo vea la imagen izquierda y el ojo izquierdo sólo vea la imagen de la derecha. Son necesarias algo de paciencia y práctica hasta conseguir una disposición adecuada de los ejes de visión, pero merece la pena.

Espumas y el cociente isoperimétrico

Consideremos ahora el problema de encontrar la forma geométrica que hemos de dar a un bloque de arcilla de volumen V para que, al pintarlo, utilicemos la menor cantidad posible de pintura. Obviamente, la cantidad de pintura necesaria será proporcional a la superficie externa S de nuestra figura de arcilla. Una cantidad adimensional que mide el éxito de nuestra empresa es el *cociente isoperimétrico*: $C_{IP} = 36\pi V^2/S^3$. El factor de 36π se escoge para que $C_{IP} = 1$ en el caso de la esfera, que representa la solución óptima. En el caso de un cubo, por ejemplo, obtenemos que $C_{IP} = \pi/6 \approx \approx 0{,}524 < 1$; es decir, necesitaremos más pintura que para cubrir la esfera.

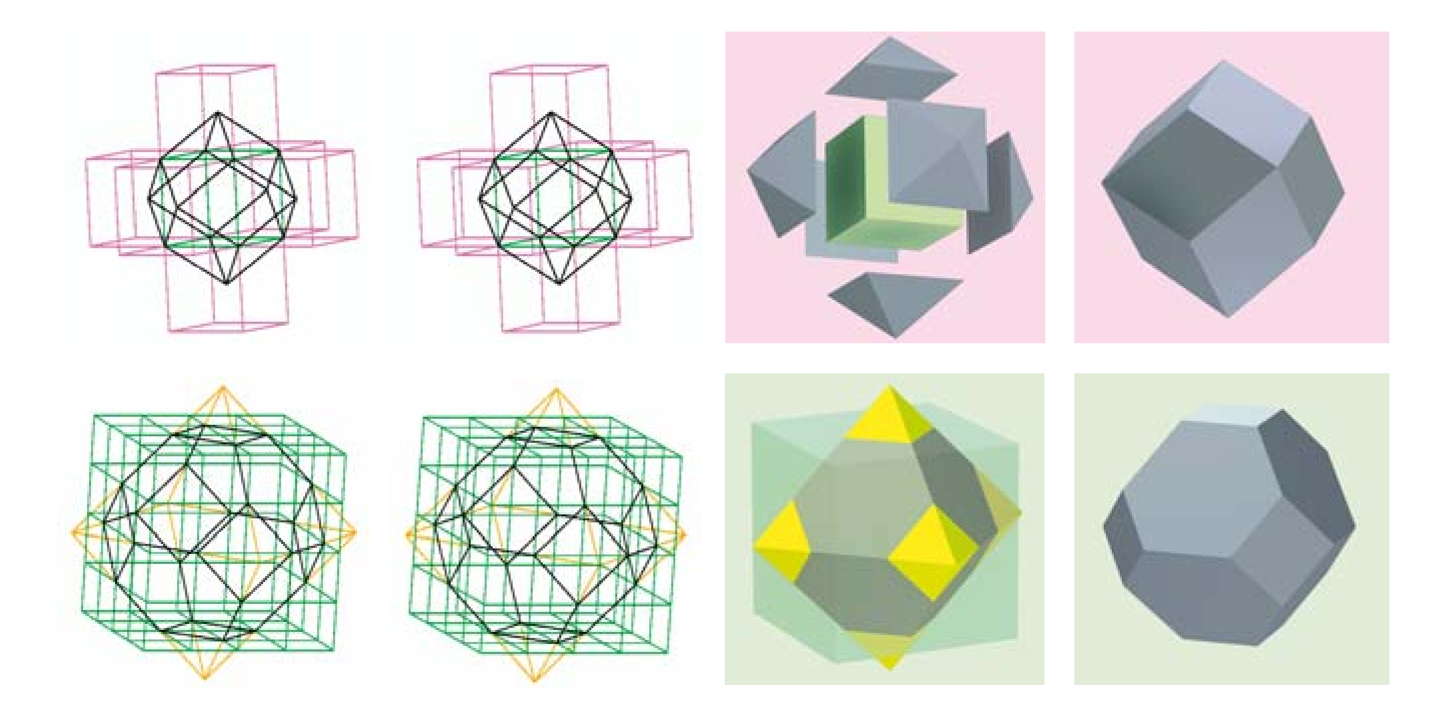
Dada su tendencia a minimizar el área, el problema de recubrir un volumen dado con la menor superficie posible se aplica también al caso de las burbujas de jabón. Una burbuja aislada es esférica, pues se trata de la solución óptima ($C_{IP} = 1$).

Podemos modelizar una espuma como un conjunto (idealmente infinito) de burbujas con igual presión interna, de modo que las paredes de separación entre las mismas tendrán curvaturas medias nulas. La pregunta que nos interesa es: ¿qué forma toman las burbujas?

William Thomson (1824-1907, más conocido como Lord Kelvin) se planteó esa cuestión cuando se esforzaba por descubrir un modelo matemático para el éter, el hipotético medio por el que habían de propagarse las ondas electromagnéticas.

Thomson consideró en primer lugar el caso más sencillo: todas las celdas son iguales y forman una disposición regular que llena completamente el espacio, tal y como lo haría una distribución de cubos idénticos apilados de manera ordenada. Pero las celdas no pueden ser cúbicas; en cada vértice concurrirían ocho celdas, doce láminas y seis aristas, lo cual es incompatible con las leyes de Plateau. Parece acertado seguir buscando otros poliedros que puedan apilarse unos sobre otros de suerte tal que, como el cubo, rellenen completamente el espacio.

El primer candidato es el dodecaedro rómbico. Para representarlo (*figura 3, superior*), comencemos con una partición regular del espacio en celdas cúbicas. Imaginemos ahora que dichas celdas se encuentran coloreadas alternadamente en blanco y negro, a la manera de lo que sería un tablero de ajedrez tridimensional. La figura del dodecaedro rómbico resulta de añadir a cada cubo blanco la porción piramidal de cada uno de sus seis vecinos negros que tiene como base las caras del cubo blanco y como cúspide el centro de los cubos negros. En cada arista del cubo original se unen las caras triangulares de dos pirámides que, dado que yacen sobre un mismo plano, conforman un rombo. Así se obtiene un poliedro delimitado por doce rombos.



La diagonal más corta de cada rombo es igual a la arista del cubo original, a la que denotaremos k. La diagonal más larga tiene por tanto la longitud $\sqrt{2}k$. De aquí hallamos una superficie total para el dodecaedro rómbico de $6\sqrt{2}k^2$ y un volumen igual a $2k^3$, lo que da un $C_{IP} \approx 0{,}740$; bastante mejor que el cubo. Pero las láminas de jabón en una espuma hipotética de dodecaedros rómbicos concurrirían en los vértices tal y como lo hacían las cúspides de las pirámides en el centro de un cubo. Como ya sabemos, esta configuración no es estable.

Kelvin y el octaedro truncado

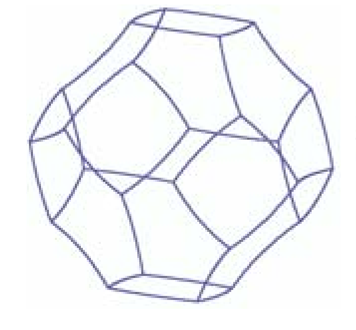
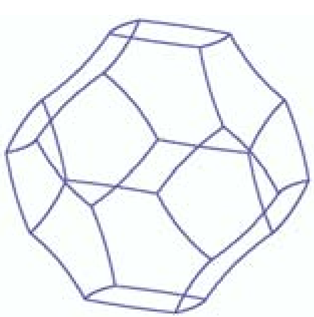
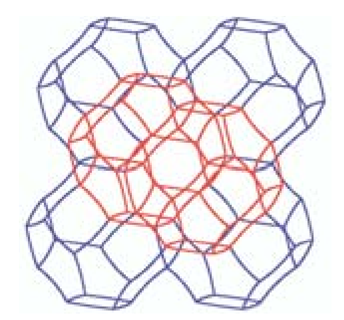
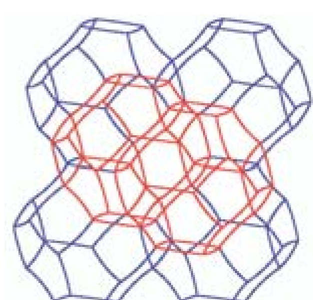
Hay otro poliedro que también rellena el espacio y que presenta un gran número de propiedades que lo hacen interesante para nuestra espuma: el octaedro truncado. Para visualizarlo, imaginemos que intersecamos un cubo de arista $4a$ con un octaedro regular (dos pirámides iguales y unidas por la base) de diagonal $6a$ según muestra la figura 3, inferior. Si eliminamos las porciones piramidales que sobresalen del cubo, el resultado es uno de los poliedros de Arquímedes: el octaedro truncado. En cada una de sus 24 esquinas (todas ellas equivalentes) concurren un cuadrado y dos hexágonos regulares. Las aristas de ambos polígonos son idénticas y su longitud viene dada por $k = \sqrt{2}a$; es decir, 1/3 de la arista del octaedro original. La superficie del poliedro está formada por seis cuadrados con área igual a k^2 y ocho hexágonos de área $3\sqrt{3}k^2/2$. El volumen del octaedro truncado resulta ser $V = 8\sqrt{2}k^3$, lo que finalmente nos da un coeficiente isoperimétrico $C_{IP} \approx 0{,}753$; algo mejor que el dodecaedro rómbico.

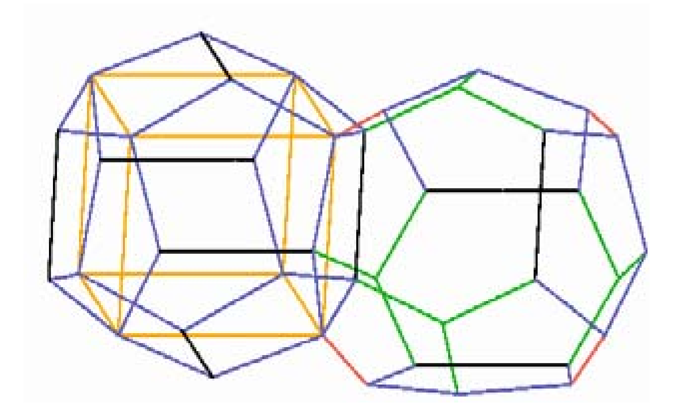
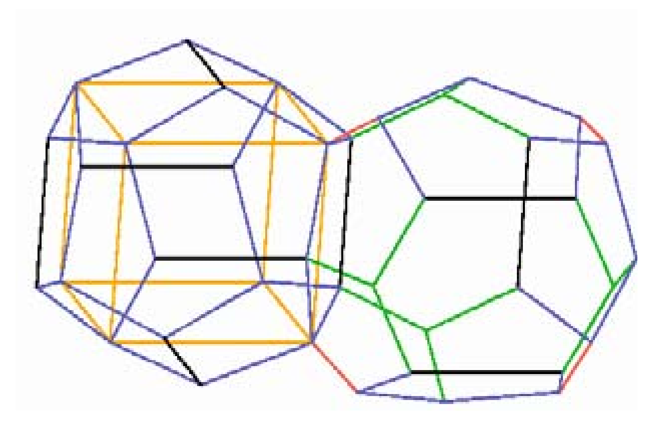
3. El dodecaedro rómbico de Catalan (*arriba*) formado a partir de siete cubos: uno central, más la sexta parte de cada uno de los otros seis. El octaedro truncado de Arquímedes (*abajo*) a partir de la intersección de un cubo con un octaedro regular.

En una configuración de octaedros truncados que llene el espacio concurren cuatro celdas en cada vértice y tres a lo largo de cada arista, como corresponde a las películas de jabón. Pero los ángulos no son aún los correctos: los que determinan dos hexágonos adyacentes son unos 10 grados menores de lo que deberían, y los que describen un cuadrado y un hexágono son unos 5 grados mayores.

¿Cómo se calculan dichos ángulos? Se determina el triángulo rectángulo cuyos vértices son el centro de la celda (A), el centro de una de las caras (B) y el centro de una de las aristas que delimitan dicha superficie (C). El ángulo en C más

4. En cada uno de los octaedros truncados de la espuma de Kelvin (*izquierda*) hay dos tipos de aristas: los bordes de los cuadrados, arqueados hacia fuera, y las aristas entre dos hexágonos, arqueadas hacia el centro del poliedro. En la espuma (*derecha*) se ve que, en cada arista, coinciden un cuadrado plano con bordes arqueados y dos hexágonos no planos. De este modo, toda la red en conjunto cuenta con un solo tipo de arista.

5. Los dos poliedros de la espuma de Phelan-Weaire. Colores iguales indican aristas de iguales longitudes. En el dodecaedro se ha dibujado un cubo naranja para resaltar la simetría.

el ángulo análogo (determinado de la misma manera) de la superficie vecina es el ángulo entre ambas caras. Con este procedimiento puede verse que el ángulo entre los hexágonos es exactamente igual al ángulo tetraédrico, si bien en el caso del tetraedro regular dicho ángulo no aparece entre superficies, sino entre las rectas de intersección. Sabemos que el ángulo entre superficies contiguas ha de ser igual a 120 grados.

Lord Kelvin halló la solución del problema, probablemente experimentando. Un día, su sobrina encontró al anciano de 63 años jugando con pompas de jabón. También había construido una red tridimensional de alambre que, a día de hoy, la Universidad de Glasgow guarda en su honor con el nombre de "el colchón de muelles de Kelvin".

Para corregir los distintos ángulos entre superficies basta con obrar de modo similar a como lo hacen las películas de jabón en el caso del cubo de alambre: curvamos ligeramente los bordes del cuadrado hacia fuera y a lo largo del mismo plano en el que yace el cuadrado. Las aristas que delimitan dos hexágonos no parecen verse afectadas por esta modificación. Sin embargo, al apilar los octaedros para llenar el espacio, un cuadrado de la celda vecina se apoya justamente en la arista entre dos hexágonos, por lo que ésta ha de deformarse en consecuencia, arqueándose hacia el interior del poliedro.

Los cuadrados quedan así transformados en "cuadrados arqueados" planos; los hexágonos no son exactamente planos, sino ligeramente ondulados (*véase la figura 4, izquierda*). El cociente isoperimétrico del poliedro deformado toma el valor $C_{PI} \approx 0{,}757$; mejor, pues, que todos los anteriores. Las intersecciones de caras y aristas cumplen las leyes de Plateau, por lo que tampoco parece haber indicios que apunten a una inestabilidad.

Mejores espumas con ayuda de dodecaedros

Kelvin estaba convencido de que la espuma ideal debía hallarse compuesta por los poliedros deformados. Hipótesis que no se refutó hasta 107 años después. En 1994, Robert Phelan y Daniel Weaire, del Trinity College de Dublín, descubrieron una espuma que más tarde sería bautizada en su honor. Su C_{IP} es aproximadamente 0,764 y es menos simétrica que la espuma de Kelvin: consta de dos tipos de poliedros irregulares en razón de 1 a 3.

El más sencillo de los dos es un dodecaedro pentagonal irregular. Imaginemos un cubo con vértices situados en las coordenadas cartesianas (±4, ±4, ±4). A cada una de sus caras añadiremos una estructura con forma de tejado, de tal modo que, en conjunto, los vértices que delimitan las seis cumbreras de estos tejados se encuentren en las coordenadas (0, ±3, ±6), (±3, ±6, 0) y (±6, 0, ±3). En cada arista del cubo original se encuentran un triángulo y un trapecio contenidos en un mismo plano. Las dos figuras generan un pentágono que cuenta con cuatro lados idénticos de longitud $\sqrt{21}$ y otro de longitud 6. La diagonal paralela a la arista más larga del pentágono coincide con la arista del cubo inicial. Así pues, el dodecaedro resultante queda delimitado por doce pentágonos con aristas de dos longitudes distintas.

No obstante, para rellenar el espacio hemos de usar otro tipo de celda más: un tetradecaedro (un polígono de 14 caras), en una proporción de tres de ellos por cada dodecaedro de la red. Cada uno de estos tetradecaedros, de igual volumen que el dodecaedro, ha de estar constituido por dos hexágonos y doce pentágonos. Los dos hexágonos, iguales entre sí, aunque no regulares, contienen aristas de dos longitudes diferentes. Se disponen en planos paralelos y están rotados 90 grados uno con respecto al otro (*véase la figura 5*). Cada hexágono queda rodeado por un anillo de seis pentágonos. Entre ellos hay dos, enfrentados entre sí, que son idénticos a las caras del dodecaedro. Los otros cuatro son iguales entre sí y exhiben simetría especular.

Vemos pues que la espuma de Phelan-Weaire queda compuesta por tres polígonos diferentes y por aristas de cuatro longitudes distintas. No es tan irregular como aparenta a primera vista: a fin de cuentas, los vértices de los dodecaedros se encuentran dispuestos en los nodos de una red cúbica regular, y en las tres direcciones espaciales se extienden "varas" de tetradecaedros apilados hexágono sobre hexágono.

¿Qué ocurre con los ángulos? En realidad, no cuadran exactamente. En el dodecaedro, los ángulos entre superficies toman valores entre 113,578 y 126,87 grados. Los métodos de optimización numérica indican que las caras deberían adoptar de nuevo una forma ligeramente abombada. Pero incluso cuando las celdas exhiben superficies planas, la espuma de Phelan-Weaire envuelve cualquier volumen concreto con menos área que la espuma de Kelvin.

Se desconoce si esta espuma es la solución teórica al problema de optimización. Tampoco se sabe si, de entre todas las espumas con celdas idénticas, la de Kelvin es la mejor (ni, si de entre las formadas por poliedros exactos —sin arquear—, el octaedro truncado es la más eficiente). Como muestra la historia, quizás el futuro nos depare sorpresas.

Una lección de humildad

Cuando no es posible creer en la veracidad de nuestras propias creencias

Gabriel Uzquiano

Hemos oído un rumor según el cual un nuevo fármaco puede aliviar cualquier dolencia. Tras consultar con nuestro médico, éste nos informa de que se trata de una sustancia inerte que, si acaso, puede actuar como placebo. Sin embargo, nos dice también que no debemos subestimar esto último:

"Si cree que el fármaco aliviará su dolencia, entonces el fármaco resultará eficaz; si no lo cree, no tendrá efecto alguno."

Como confiamos en nuestro médico, formamos la creencia de que, si creemos que el fármaco aliviará nuestra dolencia, entonces el fármaco será eficaz; si no lo hacemos, no. ¿Es nuestra nueva creencia razón suficiente para probar el fármaco? Si tan sólo pudiéramos formar la creencia de que el fármaco es eficaz... Lamentablemente, parece difícil que lo hagamos. Al contrario, la información proporcionada por nuestro médico apunta más bien a que el fármaco no va a surtir efecto alguno por sí mismo.

Nos encontramos en una situación difícil. Aunque queremos creer en la eficacia del fármaco, no disponemos de prueba alguna de ello. Como nuestro médico se percata de nuestra situación, nos dice:

"Si cree lo que le estoy diciendo ahora mismo, entonces el fármaco va a ser eficaz."

No parece que esta última afirmación resulte de mucha ayuda. ¿Cómo podría tal afirmación convencer a nadie de la eficacia de un fármaco que, por otra parte, no es más que un placebo?

Tal vez el obstáculo no se encuentre en el fármaco, sino en los límites de nuestra facultad de deducción o nuestra capacidad para la introspección. Merece la pena considerar el caso de un lógico ideal, al que denominaremos $\mathscr{L}$, que, a diferencia del resto de los mortales, es capaz de llevar a cabo cualquier razonamiento lógicamente válido. No sólo es nuestro protagonista un consumado lógico, sino que posee, además, una notable capacidad de reflexión e introspección. Si $\mathscr{L}$ cree una proposición, entonces automáticamente $\mathscr{L}$ cree que la cree. En resumen, $\mathscr{L}$ satisface las siguientes condiciones:

(i) $\mathscr{L}$ es capaz de llevar a cabo cualquier razonamiento lógicamente válido.

(ii) Siempre que $\mathscr{L}$ cree una proposición de la forma "si ϕ, entonces ψ" y $\mathscr{L}$ cree que ϕ, entonces $\mathscr{L}$ cree que ψ.

(iii) Si $\mathscr{L}$ cree que ϕ, entonces $\mathscr{L}$ cree que cree que ϕ.

(iv) $\mathscr{L}$ cree que satisface las tres condiciones anteriores: (i), (ii) y (iii).

Tras reunirse con $\mathscr{L}$, su médico ha hecho la siguiente afirmación:

"Si cree que el fármaco va a ser efectivo, entonces el fármaco va a ser efectivo."

Como $\mathscr{L}$ confía en su criterio médico, $\mathscr{L}$ ha formado la siguiente creencia:

"Si creo que el fármaco va a ser efectivo, entonces el fármaco va a ser efectivo."

Como el médico quiere que el fármaco surja efecto en $\mathscr{L}$, le dice:

"Si cree lo que le estoy diciendo ahora mismo, entonces el fármaco resultará eficaz."

No sólo es $\mathscr{L}$ un lógico ideal, sino que es sumamente meticuloso a la hora de formar nuevas creencias. Aunque $\mathscr{L}$ confía en el criterio experto de su médico a la hora de creer su primera afirmación, esta última no parece tanto una opinión médica cuanto una promesa aparentemente infundada. De manera que, como el resto de nosotros, $\mathscr{L}$ no va creer en ella a menos que encuentre un razonamiento que le obligue a ello. Ahora bien, nuestra primera observación es la siguiente:

I. *Como resultado de la segunda afirmación, $\mathscr{L}$ va a formar la creencia de que el fármaco resultará eficaz. Puesto que su médico se encuentra en lo cierto, se sigue que el fármaco va a surtir efecto en $\mathscr{L}$.*

¿Cómo podemos demostrar que $\mathscr{L}$ va a formar la creencia que necesita? Sea **E** la proposición:

(E) El fármaco resultará eficaz.

El primer paso consiste en demostrar que, al satisfacer (i)-(iv), $\mathscr{L}$ debe creer en



la segunda afirmación hecha por su médico, la cual podemos caracterizar así:

(S) Si cree que **S**, entonces **E**.

De hecho, $\mathscr{L}$ puede justificar **S** por medio del siguiente argumento:

"Muy bien, *supongamos* que:

(1) Creo que **S**.

En otras palabras:

(2) Creo que si creo que **S**, entonces **E**.

Pero al cumplir la condición (iii), si creo que **S**, entonces creo que lo creo:

(3) Creo que creo que **S**.

Usando la condición (ii), de (2) y (3) se sigue que:

(4) Creo que **E**.

Como, además, creo en la primera afirmación hecha por mi médico:

(5) Si creo que **E**, entonces **E**.

Se sigue a partir de (4) que:

(6) **E**.

A partir del supuesto de que creo en **S**, he podido concluir que **E**. Por tanto, puedo concluir que si creo que **S**, entonces **E**. ¡Pero eso es justo lo que dice **S**! Se sigue que **S** es, después de todo, cierto."

De acuerdo con (i), $\mathscr{L}$ tiene acceso al razonamiento anterior y, como consecuencia, va a formar la creencia que **S**. En otras palabras, $\mathscr{L}$ va a creer que si cree

DANIEL UZQUIANO

que **S**, entonces **E**. De (i)-(iv) se sigue que $\mathscr{L}$ cree que **E**. Pero si el médico se encuentra en lo cierto, entonces el fármaco resultará eficaz.

A estas alturas, parecería que nuestro protagonista posee motivos para confiar en la veracidad de sus propias creencias. Podemos imaginarlo razonando así:

"Sé que soy extremadamente metódico y escrupuloso a la hora de formar nuevas creencias. No acepto una creencia a menos que haya razones de peso para ello. Además, no soy el tipo de persona que comete errores de razonamiento; poseo poderes sobrehumanos de deducción, reflexión e introspección. Se sigue que tengo razones para creer en la veracidad de mis propias creencias: no creo algo a menos que sea de hecho cierto."

Ello podría sugerir que $\mathscr{L}$ debería creer toda proposición de la forma "Si creo que ϕ, entonces ϕ", lo cual sería un grave error por su parte. La siguiente observación constituye una lección de humildad para nuestro protagonista:

II. *Un lógico ideal como $\mathscr{L}$ no puede creer una proposición como "Si creo que ϕ, entonces ϕ" a menos que ya crea que ϕ.*

Analicemos el siguiente ejemplo:

(M) Existen tres reyes magos.

¿Se encuentra nuestro protagonista en posición de creer "Si creo que **M**, entonces **M**"? La arrogancia de su razonamiento anterior se vería castigada por la combinación de **M** con la siguiente proposición:

(R) Si creo que **R**, entonces **M**.

Si $\mathscr{L}$ creyera que si cree que **M**, entonces **M**, un razonamiento completamente paralelo al anterior debería llevarle a creer que **R**. Pero una vez $\mathscr{L}$ crea en **R**, ya no le queda más remedio que creer que existen tres reyes magos. Pero si $\mathscr{L}$ *no cree* en los reyes magos, tampoco puede creer que si cree que los reyes magos existen, entonces los reyes magos de hecho existen. Como no hay nada especial acerca de **M**, el razonamiento general demuestra **II**.

Veracidad y demostrabilidad en lógica formal

Una razón por la cual los problemas anteriores son de interés es que existe un paralelo estructural entre el razonamiento de un lógico ideal que *cree* varias proposiciones y un sistema formal que *demuestra* varios enunciados en un lenguaje formal.

Consideremos por ejemplo la aritmética de Peano (PA). En PA es posible codificar enunciados del lenguaje de la aritmética por medio de números naturales. Dado un código adecuado, es posible incluso codificar afirmaciones sobre la demostrabilidad de ciertos enunciados formales por medio de fórmulas del lenguaje formal. Pues bien, si **A** es un enunciado cualquiera del lenguaje, dado un código adecuado, PA demuestra la codificación del siguiente enunciado:

"PA no demuestra que 'si **A** *es demostrable en PA, entonces* **A**' *a menos que PA ya demuestre* **A**."

Este resultado se conoce como *teorema de Löb*, y constituye la contrapartida formal en PA a nuestra observación **II**. Nos dice que PA es una teoría sumamente modesta a la hora de garantizar la veracidad de los enunciados que demuestra: a menos que el propio enunciado sea demostrable en PA, PA no demuestra que su demostrabilidad sea suficiente para confiar en su veracidad.

Me gustaría concluir con una ilustración de cómo un razonamiento análogo al que atribuimos a $\mathscr{L}$ puede resultar paradójico. Al leer la prueba original del teorema de Löb, Leon Henkin, otro lógico ilustre, dio con un "argumento" para demostrar cualquier enunciado. Consideremos, por ejemplo, el enunciado de que existen tres reyes magos. Para "demostrarlo" basta con introducir el siguiente enunciado:

(R') Si **R'** es verdadero, entonces existen tres reyes magos.

El paso fundamental consiste, de nuevo, en "demostrar" **R'**. Supongamos el antecedente:

(1) **R'** es verdadero.

Entonces es verdadero lo que dice:

(2) Si **R'** es verdadero, entonces existen tres reyes magos.

Pero la combinación de (1) y (2) nos lleva a:

(3) Existen tres reyes magos.

Del razonamiento de (1) a (3):

(4) Si **R'** es verdadero, entonces existen tres reyes magos.

Pero eso es precisamente lo que dice **R'**. Por tanto, hemos demostrado que:

(5) **R'** es verdadero.

En otras palabras:

(6) Si **R'** es verdadero, entonces existen tres reyes magos.

Pero dados (5) y (6):

(7) Existen tres reyes magos.

El problema con la "demostración" es que la transición de (1) a (2), así como la de (4) a (5), hacen uso del denominado *esquema de Tarski* para la noción de verdad:

(T) " ... " es un enunciado *verdadero* si y sólo si ... ,

donde " ... " representa cualquier enunciado. (El ejemplo tradicional es: "La nieve es blanca" es un enunciado verdadero si y sólo si la nieve es blanca.) Pero este esquema da lugar a contradicciones. Para verlo, basta con tratar de asignar un valor de verdad ("verdadero" o "falso") a un enunciado como:

(L) L no es un enunciado verdadero,

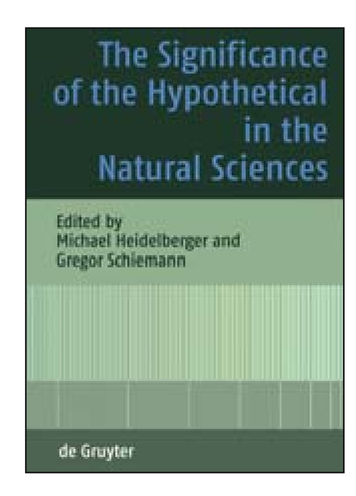
(una versión de la *paradoja del mentiroso*). Cualquier valor de verdad que le queramos asignar da lugar a una contradicción. El papel de **(T)** en la derivación de la contradicción hace que no podamos confiar en todas y cada una de sus instancias, lo cual hace que nuestra anterior "demostración" de la existencia de los reyes magos no sea tal.

¿Supone esta observación una amenaza a las consideraciones con las que iniciamos la sección? Curiosamente, la contrapartida formal de las mismas en la aritmética de Peano no hace uso alguno del esquema de Tarski y depende únicamente de premisas de toda confianza... si es que podemos confiar en los teoremas de la aritmética de Peano.

Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de Oxford.

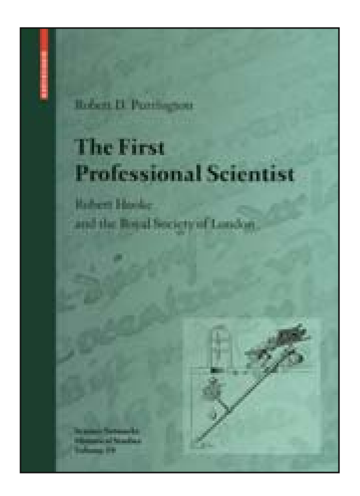
¿Quiere saber más?

La ilustración del teorema de Löb —así como la de los teoremas de incompletitud de Gödel— por medio de lógicos ideales se debe a Raymond Smullyan, que analiza los teoremas de Gödel en obras como *Forever Undecided*. Uno de sus libros traducidos al español, *¿La Dama o el Tigre?* (Cátedra, 1982), también examina los teoremas de Gödel.



THE SIGNIFICANCE OF THE HYPOTHETICAL IN THE NATURAL SCIENCES.

Dirigido por Michael Heidelberger y Gregor Schiemann. Walter De Gruyter; Berlín, 2009.



THE FIRST PROFESSIONAL SCIENTIST. ROBERT HOOKE AND THE ROYAL SOCIETY OF LONDON,

por Robert D. Purrington. Birkhäuser; Basilea, 2009.

Epistemología

Hipótesis y experimentos

Sobre la hipótesis y la contrastación empírica, el experimento, bascula la ciencia. Fue genuino innovador de la primera Henri Poincaré (1854-1912); creador de la segunda, Robert Hooke (1635-1703). A ellos se consagran, respectivamente, *The significance of the Hypothetical in the Natural Sciences* y *The First Professional Scientist. Robert Hooke and the Royal Society of London*. En su introducción a *La science et l'hypothèse*, libro publicado en 1902, subrayaba Poincaré la necesidad de las hipótesis como herramientas requeridas para las ciencias formales y experimentales. Retomaba lo que, en el comienzo de la era moderna, parecía indiscutible: los enunciados provisionales o hipotéticos resultaban determinantes en el avance del conocimiento. Los conceptos de hipótesis de Johannes Kepler, René Descartes, Isaac Newton y Gottfried Wilhelm Leibniz constituyen ejemplos palmarios.

Poincaré sostenía que los axiomas de la geometría eran convenciones (o definiciones simuladas), pero no hipótesis sobre el comportamiento de los rayos luminosos o los cuerpos sólidos. Pero no todas las hipótesis encierran el mismo valor epistemológico. Algunas son más influyentes que otras a la hora de determinar el curso de la ciencia. Categorizó tres tipos de hipótesis: generalizaciones o hipótesis verificables, hipótesis indiferentes e hipótesis naturales. Las verificables, que ejemplificaba en la hipótesis de las fuerzas centrales, se caracterizan por su sometimiento a la contrastación experimental. Hay hipótesis verificables, o hipótesis físicas, que una vez expresadas en lenguaje matemático, manifiestan la estructura de la naturaleza. Generalizar una hipótesis es proceder "como si" pudiera extenderse a una infinidad de casos sin verificar.

El segundo tipo de hipótesis, las indiferentes, que sirven para fijar nuestro pensamiento, constituyen una premisa en una cadena deductiva. Ejemplos de hipótesis indiferentes abarcan las masas escondidas de la mecánica de Hertz y la interpretación física de los vectores axiales y polares de la óptica clásica. Puede ocurrir que un teórico pueda preferir una hipótesis u otra para simplificar un cálculo, pero la corroboración experimental de la teoría no tiene por qué determinar la verdad de la hipótesis escogida.

El tercer tipo es la hipótesis totalmente natural. Suelen ser normas experimentales intuitivas, del estilo de la regla de la mano derecha. Son las últimas que debemos abandonar. (Poincaré habló también de hipótesis aparentes, que no eran más que convenciones, como el axioma de las paralelas en geometría euclídea.) Las hipótesis naturales podían considerarse condiciones experimentalmente inaccesibles a la ciencia o reglas prácticas. Las convenciones, prosigue, son decretos impuestos a nuestra ciencia; de hecho, la posibilitan. En mecánica clásica, se supone, por convención, que los cuerpos se mueven en el espacio geométrico euclidiano. Esa convención simplifica operaciones de medición y cálculo, sin que ello signifique que el espacio físico corresponda al espacio euclídeo.

Sabido es que Poincaré opta por el convencionalismo, del que algunos le reconocen la primogenitura. De acuerdo con la doctrina convencionalista del espacio, que elaboró en el decenio de los noventa del siglo XIX, la geometría del espacio físico es un asunto de definición, no un *factum*. En un esfuerzo por salvar la geometría euclídea que se apoyaba en el axioma de la movilidad libre de los sólidos invariables, Poincaré extendió esa idea al espacio y al tiempo. El convencionalismo geométrico se desarrolla en una serie de enunciados, que podríamos concatenar como sigue: la experiencia no se relaciona con el espacio, sino con los cuerpos empíricos; la geometría se ocupa de los cuerpos ideales y, por consiguiente, ni puede ser demostrada ni negada por la experiencia; y puesto que los axiomas de la geometría tampoco pueden ser analíticos, esas proposiciones deberán ser meras convenciones, ni verdaderas ni falsas. Pero podemos hablar de verdad, una vez se ha adoptado la convención. La elección entre convenciones y, en particular, entre geometrías diferentes, viene guiada por la experiencia. La geometría euclídea no tiene nada que temer de la experiencia.

La historia de la filosofía de la ciencia del siglo XX está marcada por su filosofía convencionalista de la geometría, que enervó a Ernst Cassirer, Moritz Schlick y Hans Reichenbach en el primer tercio de la centuria, a Philipp Frank, Ernest Angel y Adolf Grünbaum en los decenios centrales, y a Lawrence Sklar, Hilary Putnam, David Malament, Michael Friedman y otros en el tercio final. Buena

parte de esta discusión filosófica se ocupa del convencionalismo de la simultaneidad en la teoría de la relatividad, problema distinto, por un lado, del problema del convencionalismo de la simultaneidad en la mecánica clásica y, por otro, del problema de Riemann-von Helmholtz-Lie del espacio.

En la transformación del concepto moderno de ciencia, que supuso el tránsito de la certeza a la hipótesis, Werner Heisenberg desempeñó un papel destacado. Su doctrina de las "teorías cerradas" postulaba que las teorías físicas carecían de validez universal y exclusiva, para limitarse a una validez restringida. Los comienzos de ese proceso se remontaban a un siglo atrás, con la epistemología de John Herschel, William Whewell y Hermann von Helmholtz. En la filosofía contemporánea de la ciencia, la condición hipotética del conocimiento científico suele reputarse irrelevante para la cuestión de una interpretación realista o antirrealista de la ciencia.

Nadie cuestionará que la profesionalización del científico, y con ella el recurso constante a la experimentación, comienza con Robert Hooke, contemporáneo de Christopher Wren, Robert Boyle e Isaac Newton y amigo de todos ellos, salvo de Newton. Trabajó cuarenta años en la Regia Sociedad, fundada en 1660, como relator y encargado de ensayos. Interesado en pneumática, magnetismo, astronomía, mecánica, horología, óptica, microscopía, gravedad y cambios en la Tierra, su *Micrographia*, publicada en 1665, es uno de los clásicos de la bibliografía científica. Desarrolló una carrera paralela en topografía, construcción y arquitectura, resaltada en su imponente labor en la reconstrucción de Londres tras el gran incendio de 1666. Muchas de las iglesias atribuidas a Wren son proyectos de Hooke. A Newton le ofrece la clave para comprender la dinámica planetaria.

Hooke nació en Freshwater, isla de Wight, donde su padre era párroco anglicano. De salud enfermiza, le atraía la modelización, montar y desmontar relojes, recoger fósiles y conchas, percatándose de la presencia de muchas de éstas muy por encima del nivel del mar. Su padre lo envió a Londres de meritorio del retratista Peter Lely. Pero su aversión a los aceites y a las pinturas le hicieron abandonar el camino de la pintura. Entró en la Escuela de Westminster, a los 15 años, llamando pronto la atención del director, Richard Busby, quien lo tomó bajo su tutela. Treinta años más tarde, Hooke diseñaría una iglesia para él.

Con Busby, fue John Wilkins su otro mentor, ahora en Oxford. Y, por encima de todos, Robert Boyle, quien fue su primer modelo de filósofo natural y prestó a un joven veinteañero un laboratorio donde ejerciera su trabajo, también en Oxford. En Westminster, recibió una educación clásica y estudió a Euclides, ejercitando además sus aficiones mecánicas. A los 18 años (1653) se trasladó al colegio oxoniense Christ Church. Boyle tomó a Hooke como su ayudante, un aprendizaje que le catapultaría para su posterior empleo como encargado de experimentos de la Regia Sociedad: no sólo se forjó en el dominio de la técnica experimental, sino que absorbió también las ideas de su mentor sobre la filosofía mecanicista y corpuscular. Hooke contribuyó y perfeccionó la bomba de aire de Boyle. Los experimentos que elucidaron la "ley de Boyle" fueron realizados sin duda por Hooke, quien a su vez reconoce la obra precedente realizada por Richard Townely y Henry Power, a quienes se les debe en buena medida el descubrimiento de la relación entre volumen y presión.

Cuando Hooke abandonó a Boyle y Oxford por Londres tenía 27 años y había trabado conocimiento con numerosos científicos. Cumplió un papel doble en los primeros años de la Sociedad, en un comienzo como un joven empleado prometedor, pero sin estatuto, y muy pronto, a los 30 años, convertido en la fuente principal de conocimientos sobre los problemas de filosofía natural que se presentaban ante la institución. Buena parte de la información sobre Hooke se apoya en su *Diary*, fascinante y rico en datos, que mantuvo desde la treintena hasta la cincuentena. Esos apuntes deben combinarse con los fondos de la City de Londres y el descubrimiento en 2006 de una caja con sus notas y cartas.

El grupo que daría en llamarse "Regia Sociedad" el 15 de julio de 1662 llevaba ya reuniéndose dos años, tras el acta de fundación que empezó con una disertación de Wren a finales de noviembre de 1660. Buena parte del grupo se venía reuniendo con anterioridad en el Grasham College. La importancia de la Regia Sociedad en los inicios de la revolución científica se centra en el tipo de investigación que se realizó, cómo fue contemplada y registrada y cómo ellos apoyaron o interpretaron la filosofía mecanicista. Los años formativos de la Sociedad fueron 1660-1672. Por lo que concierne a Hooke se corresponde casi exactamente con su primer decenio en la institución, 1662-72. Y concluye justo cuando Newton entra en escena, que representa una suerte de ruptura natural, y es también en 1672 cuando Hooke comenzó su *Diary*, que ilumina los hechos del decenio siguiente.

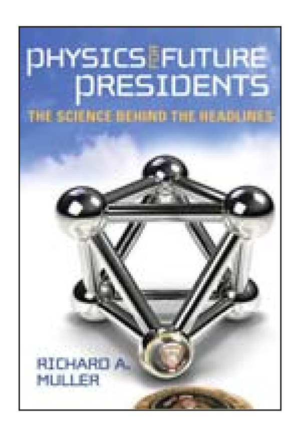
En sus primeros años, la Sociedad carecía de plan de actuación. Las sesiones respondían a los intereses peculiares de sus miembros. Había cuestiones que se abordaban de forma más sistemática que otras. Eran recurrentes las exposiciones relativas a aspectos de la pneumática, muchos de cuyos experimentos iniciales llevaban el sello de Boyle y la ejecución de Hooke. Abundan las disertaciones sobre armas de fuego, formación de sifones, química elemental y experimentos de magnetismo. Sin olvidar lucubraciones aventuradas sobre insectos, venenos, víboras, incluida su supuesta generación a partir de materia inerte.

Las maravillas que Hooke revelaba en sus dibujos exquisitos de objetos contemplados a través del microscopio causaron sensación cuando se divulgó su *Micrographia*. El lugar de honor que Hooke ocupa en la historia de la microscopía procede menos de sus contribuciones al diseño del microscopio, que fueron modestas, cuanto a sus descubrimientos sirviéndose del mismo, incluido su atisbo de la célula vegetal. En otro orden, los trabajos sobre el péndulo simple cobrarían particular relieve con la consideración de la fuerza viva y fuerza muerta (nuestras energías cinética y potencial), si bien en su origen estaban motivados por la necesidad de una computación exacta del tiempo, sobre todo en navegación en mar abierto y por la urgencia de la determinación de la longitud.

En 1669 Wren y Hooke propusieron máquinas de pulir que generasen superficies hiperboloides y elipsoides, como medio de mejorar diversos aparatos ópticos. En julio de ese mismo año Hooke comunicó a la institución una observación singularísima: lanzó una auténtica bomba en 1669 cuando declaró en la sesión de julio que había detectado la paralaje in-

ducida por la órbita terrestre, la aparente desviación de una estrella debido a la revolución de la Tierra alrededor del Sol, un descubrimiento que habría por fin establecido el movimiento anual de traslación. El episodio epitomiza la carrera de Hooke: un brillante empeño en resolver un problema candente en su tiempo, el de la demostración del movimiento de la Tierra a través del espacio, ejecutado con un gran cuidado e ingenio mecanicista. Arribado el otoño, a requerimiento del rey, se promovió la medición de un grado de arco de la superficie de la Tierra. Hooke fue integrado en un comité de ocho miembros encargado de llevarlo a cabo. No tuvieron éxito.

Luis Alonso



PHYSICS FOR FUTURE PRESIDENTS. THE SCIENCE BEHIND THE HEADLINES,

por Richard A. Muller. W. W. Norton & Company; Nueva York, 2008.

Física y sociedad

Lo que todo ciudadano debería saber

Cada vez con mayor frecuencia, los parlamentos y los gobiernos de los países democráticos deben tomar decisiones de suma importancia que requieren conocimientos científicos y técnicos básicos. Muchas de estas decisiones conllevan graves repercusiones para sus sociedades respectivas y, en numerosos casos, para el mundo entero. La mayoría de los políticos que integran cámaras y gobiernos, salvando ciertas excepciones, carecen de formación científica o técnica básica, por lo que se ven obligados a decidir en función de sus prejuicios o ideología. Sólo en el mejor de los casos cuentan con el asesoramiento de comités expertos; pero incluso entonces, la elección de los asesores se basa no sólo en criterios científicos.

El título lo deja bien claro: el propósito de este libro es proporcionar a un futuro presidente de los EE.UU. unas bases de conocimiento en el campo de la física, más allá de los lugares comunes que suelen resaltar los medios de comunicación y que no siempre se sustentan sobre fundamentos sólidos. Debería ser de lectura obligada para todo responsable político, al menos para los que participen en comisiones de ciencia y tecnología, o equivalentes, y que deban ayudar a formar la opinión de otros colegas menos ilustrados. Muchos políticos, si se hubieran tomado la molestia de leerse las 346 páginas de este libro, no habrían lanzado ciertas afirmaciones alegres, claramente demagógicas, aunque electoralmente eficaces.

El libro se organiza en cinco partes, cada una centrada en un tema: terrorismo, energía, armamento nuclear, espacio y calentamiento global. Cada sección viene precedida de una breve introducción y termina con un sumario presidencial, para el caso en que el futuro presidente —o quien quiera que sea el lector— ande mal de tiempo.

Si bien el autor toma partido en algunos de los temas expuestos, lo hace basándose en algo tan imparcial como son los principios de la física y con argumentos irrefutables que, por descontado, no agradarán a todos, en especial a quien base sus opiniones en prejuicios o ideologías. Por ejemplo, explica detalladamente las características y los conceptos de la radiactividad, en relación a los posibles ataques terroristas, así como a los problemas ligados a la energía nuclear. Expone las bases del problema de la energía, desde sus fuentes hasta sus costes, y analiza posibles soluciones —y falsas soluciones—. Describe también los principios de la ciencia del espacio, desde la comparación entre las ventajas de las misiones tripuladas y las robóticas a las distintas opciones militares. Discute ampliamente las relaciones causales del cambio climático; asimismo, explica los criterios que usan los científicos para afirmar que cierta causa provoque un determinado efecto y expone algunas críticas a los razonamientos de Al Gore en su famoso documental.

Con todo, el libro no sólo resulta útil a los políticos. Aporta muchísima información desconocida por buena parte de los científicos profesionales —incluido quien firma esta reseña—. También los docentes de secundaria y universitarios, que se esfuerzan por hacer atractiva la ciencia a estudiantes poco interesados, encontrarán una fuente de ejemplos cotidianos que harán que los alumnos perciban la ciencia como algo "útil". De hecho, el mismo autor ha publicado ya un libro de texto de contenido similar (*Physics and Technology for Future Presidents. An Introduction to the Essential Physics Every World Leader Needs to Know*; Princeton University Press, 2010).

Los puntos de vista, bien definidos, que presenta el autor, serán tachados de sesgados o incorrectos por los apóstoles de cada tema tratado, ya sea porque se basan en ideas científicas poco sólidas o en supuestas posiciones progresistas. Pero pocos podrán acusar al autor de falta de autoridad científica. Aunque para algunos no revista importancia, Muller es profesor de física de la Universidad de California en Berkeley. El texto se basa en un curso de física, y otras materias, para estudiantes, lo que garantiza que el libro esté al alcance de cualquier lector culto. Las fórmulas son escasas; aparecen sólo en las extensas notas que sirven para apoyar sus razonamientos.

Para acabar, recomiendo este libro no sólo a toda la clase política, sino también a toda persona culta, incluidos los responsables de los medios de comunicación, tan habituados a ser tribuna de indocumentados. Sería muy conveniente la traducción de este libro a otros idiomas, a fin de ponerlo al alcance de los que no saben inglés.

Ramón Pascual

EN EL PROXIMO NUMERO DE JUNIO 2010

ESPECIAL: SOSTENIBILIDAD

Límites de un planeta sano,
por Jonathan Foley

Soluciones para las amenazas ambientales,
por VV.AA.

Desterrar el hábito de crecer,
por Bill McKibben



Maravillas del sistema solar,
por Edward Bell

El artista Ron Miller nos muestra ocho de los paisajes más bellos de nuestro sistema solar.



La vida secreta de las trufas,
por James M. Trappe y Andrew W. Claridge

Más allá del refinamiento gastronómico, las trufas desempeñan funciones ecológicas esenciales.

Genes, cultura y dieta,
por Olli Arjamaa y Timo Vuorisalo

Biología y cultura interaccionan en el desarrollo de nuestros hábitos alimentarios.

Circuitos defectuosos,
por Thomas R. Insel

La neurociencia comienza a desentrañar las conexiones aberrantes que dan lugar a trastornos psicológicos. Los psiquiatras deberán reconsiderar las causas de la enfermedad mental.

